



**João Miguel
Fernandes Pinto
de Matos**

Secagem pressurizada de madeira



**João Miguel
Fernandes Pinto
de Matos**

Secagem pressurizada de madeira

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Fernando José Neto da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

*“Grandes realizações são possíveis quando se dá atenção aos pequenos
começos”*

Lao Tsé

O júri

Presidente

Professor Doutor Nelson Amadeu Dias Martins

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Fernando José Neto da Silva

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

(Orientador)

Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo

Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Agradecimentos

Tratando-se de um trabalho que representa um culminar de um objectivo, gostaria de agradecer a algumas pessoas.

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Fernando José Neto da Silva, pela disponibilidade, apoio prestado e acompanhamento do trabalho ao longo destes meses. Ao Sr. Eng. João Teles e Sr. Eng. António Festas pelo apoio técnico, disponibilidade e simpatia para a resolução de algum problema da estação de secagem. À aluna de Doutoramento Camila Boeri pelas conversas de grande utilidade sobre secagem, ao Ricardo Norte pelos esclarecimentos do *software* e funcionamento da estação de secagem e ao Bruno pelas opiniões e troca de ideias sobre o meu trabalho no laboratório de termofluidos.

Agradeço aos meus amigos Tiago, Edson, Nuno, Bruno, Valter, Alex, Altino, Gonçalo e Sónia pela amizade e apoio ao longo destes anos.

À Raquel pela ajuda prestada e incansável apoio.

Agradeço à minha família pela oportunidade proporcionada e por todo o apoio prestado ao longo destes anos de estudo.

Palavras-chave

Madeira, Secagem, Vapor sobreaquecido, Pressão, Temperatura, Velocidade do escoamento, Qualidade, Consumo energético.

Resumo

Desde cedo a floresta tornou-se fonte de um material chave até ao tempo presente, com inúmeras aplicações – a madeira. Na natureza, a madeira encontra-se disponível em grandes quantidades mas geralmente com um conteúdo de humidade muito elevado. Para ser utilizada nas melhores condições, esse conteúdo de humidade deve ser substancialmente reduzido. A secagem é um processo em constante desenvolvimento e é neste sentido que foi ensaiada a secagem pressurizada de madeira a alta temperatura.

Foram definidas as variáveis operatórias e a gama de variação – temperatura (125, 135 e 145°C), pressão absoluta (1, 1.5 e 2 bar) e velocidade de escoamento (2, 6 e 10 m.s⁻¹), assim como o protocolo experimental a realizar.

Após a realização das experiências e análise dos resultados obtidos observou-se que a taxa de secagem é influenciada pelas condições operatórias, isto é, a taxa de secagem aumenta com o aumento da temperatura, a diminuição da pressão e aumento da velocidade de escoamento. A duração de cada experiência também é influenciada pelas condições operatórias, uma vez que diminui com o aumento da temperatura, diminuição da pressão e diminuição da velocidade do fluido. Nas experiências realizadas obtiveram-se tempos de duração entre 7,52 horas e 22,43 horas.

A diferença entre a temperatura de bolbo seco e bolbo húmido é também, um factor importante pois influencia a remoção de humidade. Foi obtido um valor máximo de 13,27% em conteúdo de humidade final para 125°C, 2 bar e 10 m.s⁻¹, sendo o valor mínimo obtido de 2,14%, para 145°C, 1 bar e 2 m.s⁻¹.

A nível da estrutura e dimensões observou-se que o processo provoca alterações nas dimensões da tábua assim como defeitos de secagem, tais como, torção, colapso, abertura de fendas existentes, defeitos nos nós e coloração.

Finalmente, a análise ao consumo de energia do processo revelou uma forte dependência do consumo do ventilador relativamente à velocidade de ventilação. Curiosamente, não se verifica dependência semelhante no consumo energético das resistências de aquecimento com a temperatura, uma vez que um aumento da temperatura não implica um aumento no consumo das resistências.

Keywords

Lumber, Drying, Superheated steam, Pressure, Temperature, Flow velocity, Quality, Energetic consumption.

Abstract

From early on, the forest became the source of a key material until the present time, with many applications - wood. In nature, wood is available in large quantities but usually with a very high moisture content. To be used in the best conditions, the moisture content must be substantially reduced.

Drying is a process in constant development and this is why pressurized high temperature wood drying was tested.

The operative variables and the range of variation - temperature (125, 135 and 145 °C), absolute pressure (1, 1.5 and 2 bar) and flow velocity (2, 6 and 10 m.s⁻¹) were defined, as well as the experimental protocol to be implemented.

After the execution of the experiments and analysis of results, it was showed that the drying rate is influenced by operating conditions, ie, the drying rate increases with increasing temperature, pressure reduction and increasing flow velocity. The duration of each experiment is also influenced by operating conditions, since it decreases with increasing temperature, decreased pressure and decreased fluid velocity. In the experiments were obtained duration times between 7,52 hours and 22,43 hours.

The difference between dry bulb temperature and wet bulb temperature is also an important influence on the removal of moisture. The maximum value of moisture content obtained was 13,27%, for 125°C, 2 bar and 10 m.s⁻¹, and the minimum value was 2,14%, for 145°C, 1 bar and 2 m.s⁻¹.

In the analysis of the structure and size of the wood, it was noted that the process causes changes in the dimensions of the board as well as drying defects such as twist, collapse, opening of cracks, defects in knots and color.

Finally, in the analysis of the energy consumption revealed strong dependence of the consumption of the blower on the fluid velocity. Interestingly, there is no similar reliance on consumption of heating resistance with temperature, since an increase in temperature does not imply an increase in consumption of resistance.

Índice

Índice.....	i
Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas.....	xi
Lista de abreviaturas.....	xiii
Nomenclatura	xv
1 Introdução.....	17
1.1 Objectivos da dissertação	17
1.2 Estrutura da tese	18
2 Madeira.....	19
2.1 Madeira de <i>Pinus pinaster</i> na indústria	19
2.2 Estrutura da madeira.....	21
2.3 Humidade na madeira.....	23
2.4 Processo de secagem	28
2.5 Defeitos de secagem na madeira	32
2.5.1 Fendas (surface checking) e aberturas (splitting)	34
2.5.2 Torção.....	34
2.5.3 Colapso (collapse)	35
2.5.4 Endurecimento (casehardening)	36
2.5.5 Ninho de abelhas (honeycombing)	37
2.5.6 Descoloração e aparecimento de manchas.....	37
2.6 Nemátodo da madeira do pinheiro	38
3 Estado de arte.....	41
3.1 Secagem de madeira ao ar livre.....	41
3.2 Secagem de madeira em forno convencional	42
3.3 Secagem em forno a alta temperatura.....	44
3.4 Secagem pressurizada a alta temperatura com vapor sobreaquecido	47
3.5 Vantagens e desvantagens do processo de secagem pressurizada de madeira com vapor sobreaquecido	50
4 Instalação de secagem.....	51
4.1 Estação de secagem.....	51
4.1.1 Sistema de controlo e aquisição de dados.....	51
4.1.2 Sistema de aquecimento	53
4.1.3 Sistema de ventilação	53
4.1.1 Sistema de injeção de água	54
4.1.2 Sistema de injeção de ar comprimido	55
4.1.3 Sistema de pressurização	56

4.1.4	Sistema de pesagem da tábua em contínuo	56
4.1.5	Sistema de medição de valores de variáveis.....	57
5	Planificação experimental	59
5.1	Madeira	59
5.2	Protocolo experimental	60
5.2.1	Preparação da tábua.....	61
5.2.2	Processo de secagem	63
5.2.3	Análise da tábua após secagem	64
5.2.4	Tratamento dos dados obtidos.....	64
5.3	Condições operatórias	66
5.3.1	Método de Taguchi	66
6	Realização experimental e análise individual de experiências	71
6.1	Experiência 0 – secagem convencional.....	71
6.2	Experiência 1	76
6.3	Experiência 2*	82
6.4	Experiência 2	87
6.5	Experiência 3	93
6.6	Experiência 4	98
6.7	Experiência 5	104
6.8	Experiência 6*	110
6.9	Experiência 6	114
6.10	Experiência 7	119
6.11	Experiência 8	123
6.12	Experiência 9	129
6.13	Experiências complementares.....	134
6.13.1	Pressão atmosférica e temperatura de 145°C.....	134
6.13.2	Pressão 1,5 bar e temperatura de 145°C	135
6.13.3	Experiência 6**.....	136
7	Análise global de resultados	139
7.1	Caracterização dimensional das tábuas	139
7.2	Conteúdo de humidade inicial.....	140
7.3	Taxa de secagem.....	141
7.3.1	Experiências a temperatura constante – grupo T.....	142
7.3.2	Experiências a pressão constante – grupo P	144
7.3.3	Experiências a velocidade constante – grupo v	145
7.4	Conteúdo médio de humidade.....	145
7.5	Conteúdo de humidade final	148
7.6	Comparação com conteúdo de humidade em equilíbrio – E.M.C.....	149
7.7	Análise qualitativa dos defeitos de secagem.....	151

7.8	Consumo energético do processo de secagem.....	155
8	Conclusões e sugestões	159
8.1	Conclusões sobre os resultados obtidos.....	159
8.2	Limitações do trabalho e sugestões para um trabalho futuro.....	161
	Referências bibliográficas	163
	Anexo A – Dados de condições operatórias aplicadas à secagem de madeira	167
	Anexo B – Tabela termodinâmica de vapor	169
	Anexo C – Tabelas-resumo relativas às experiências.....	171
	Anexo D – Estação de secagem.....	175
	Anexo E – Peças substituídas na instalação	177

Índice de Figuras

Figura 2-1: Ocupação territorial de <i>Pinus pinaster</i>	19
Figura 2-2: Produção e consumo de madeira <i>Pinus pinaster</i>	20
Figura 2-3: Distribuição da aplicação de madeira <i>Pinus pinaster</i>	21
Figura 2-4: Secção transversal do tronco de uma árvore, mostrando as principais componentes do lenho e da casca	21
Figura 2-5: Direcções consideradas.....	23
Figura 2-6: Formas de humidade na madeira	23
Figura 2-7: Níveis finais humidade de referência.....	24
Figura 2-8: Relação entre o conteúdo de humidade da madeira, temperatura e humidade relativa do ar à pressão atmosférica.....	26
Figura 2-9: Conteúdo de humidade de equilíbrio da madeira e conteúdo de vapor da atmosfera em vapor sobreaquecido puro e misturas de ar e vapor sobreaquecido (à pressão atmosférica)	27
Figura 2-10: Conteúdo de humidade de equilíbrio da madeira e conteúdo em vapor a diferentes pressões....	28
Figura 2-11: Curva característica de secagem para materiais porosos	29
Figura 2-12: Ocorrência cronológica de defeitos de secagem	33
Figura 2-13: Relação entre defeitos e zona de corte para a tábua.....	33
Figura 2-14: Exemplo de fendas e aberturas em tábua de madeira	34
Figura 2-15: Várias formas de torção (secção transversal e longitudinal).....	35
Figura 2-16: Exemplo de uma tábua colapsada e seguida do reacondicionamento	36
Figura 2-17: Teste para verificação de endurecimento	36
Figura 2-18: Aspecto da tábua com ninho de abelhas	37
Figura 2-19: Exemplo de mancha numa tábua	38
Figura 2-20: Aspecto de um pinheiro bravo atacado por NMP	39
Figura 4-1: Estação de secagem	51
Figura 4-2: Ambiente inicial do <i>software</i>	52
Figura 4-3: Janela de definição das variáveis operatórias e tempo de aquisição de dados	52
Figura 4-4: Janela de comandos manuais	53
Figura 4-5: zona de suspensão da tábua (distâncias em mm)	54
Figura 4-6: Janela do <i>software</i> que permite ao operador controlar o tempo e intervalo de injeção.....	55
Figura 4-7: Regulação da pressão no interior do sistema	56
Figura 4-8: Célula de carga/apoio	57
Figura 4-9: Apoio para a tábua	57
Figura 4-10: Encaixe da tábua no sistema de apoio.....	57
Figura 5-1: Representação esquemática das tábuas de pinho verde (unidades em mm).....	59
Figura 5-2: Tronco de <i>Pinus pinaster</i>	59
Figura 5-3: 4 rolos de 2.5 m de comprimento	59

Figura 5-4: Tábuas 2.5 m de comprimento	59
Figura 5-5: Tábua embrulhada em saco preto, e respectivos sacos e fita isoladora	59
Figura 5-6: Esquema resumido dos passos do protocolo experimental.....	60
Figura 5-7: Caracterização dimensional da tábua	61
Figura 5-8: A: Representação esquemática dos cortes das amostras da tábua inicial; B: Amostra.....	62
Figura 5-9: Planos da tábua.....	62
Figura 5-10: Localização dos termopares na tábua	63
Figura 5-11: Representação de corte e numeração das 10 amostras finais.....	64
Figura 6-1: A – Humidade inicial da tábua 0; B – Humidade final da tábua 0	72
Figura 6-2: Localização das amostras e fracções na tábua 0 e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %	73
Figura 6-3: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 0; B – Evolução do <i>steam content</i> na experiência 0	73
Figura 6-4: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 0	74
Figura 6-5: A – Massa da tábua 0; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 0.....	75
Figura 6-6: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade.....	76
Figura 6-7: A – Humidade inicial da tábua 1; B – Humidade final da tábua 1	77
Figura 6-8: Localização das amostras e fracções na tábua 1 e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %	78
Figura 6-9: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 1; B – Evolução do <i>steam content</i> na experiência 1	78
Figura 6-10: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 1	79
Figura 6-11: A – Massa da tábua 1; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 1.....	80
Figura 6-12: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade.....	81
Figura 6-13: A – Humidade inicial da tábua 2*; B – Humidade final da tábua 2*	83
Figura 6-14: Localização das amostras e fracções na tábua 2* e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %	83
Figura 6-15: Evolução da humidade e velocidade do escoamento durante a experiência 2*.....	84
Figura 6-16: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 2*	84
Figura 6-17: A – Massa da tábua 2*; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 2*.....	86
Figura 6-18: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade.....	87
Figura 6-19: A – Humidade inicial da tábua 2; B – Humidade final da tábua 2	88
Figura 6-20: Localização das amostras e fracções na tábua 2 e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %	89
Figura 6-21: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 2; B – Evolução do <i>steam content</i> na experiência 2.....	89

Figura 6-22: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 2.....	90
Figura 6-23: A – Massa da tábua 2; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 2.....	91
Figura 6-24: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade.....	92
Figura 6-25: Diferentes declives da taxa de secagem.....	92
Figura 6-26: A – Humidade inicial da tábua 3; B – Humidade final da tábua 3.....	93
Figura 6-27: Localização das amostras e fracções na tábua 3 e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %	94
Figura 6-28: Nós na fracção A4	94
Figura 6-29: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 3; B – Evolução do <i>steam content</i> na experiência 3	95
Figura 6-30: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 3.....	95
Figura 6-31: A – Massa da tábua 3; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 3	97
Figura 6-32: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade	97
Figura 6-33: Diferentes declives da taxa de secagem.....	98
Figura 6-34: A – Humidade inicial da tábua 4; B – Humidade final da tábua 4.....	99
Figura 6-35: Localização das amostras e fracções na tábua 4 e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %	99
Figura 6-36: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 4; B – Evolução do <i>steam content</i> na experiência 4	100
Figura 6-37: Evolução da pressão do sistema durante a experiência 4.....	100
Figura 6-38: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 4.....	101
Figura 6-39: A – Massa da tábua 4; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 4	103
Figura 6-40: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade	104
Figura 6-41: A – Humidade inicial da tábua 5; B – Humidade final da tábua 5.....	105
Figura 6-42: Localização das amostras e fracções na tábua 5 e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %	105
Figura 6-43: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 5; B – Evolução do <i>steam content</i> na experiência 5	106
Figura 6-44: Evolução da pressão do sistema durante a experiência 5.....	106
Figura 6-45: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 5.....	107
Figura 6-46: Influência da pressão na evolução das temperaturas do sistema e termopares localização dos termopares na madeira.....	108
Figura 6-47: A – Massa da tábua 5; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 5	109
Figura 6-48: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade	109
Figura 6-49: A – Humidade inicial da tábua 6*; B – Humidade final da tábua 6*.....	111

Figura 6-50: Localização das amostras e frações na tábua 6* e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %	111
Figura 6-51: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 6*; B – Evolução do <i>steam content</i> na experiência 6*	111
Figura 6-52: Evolução da pressão do sistema durante a experiência 6*	112
Figura 6-53: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 6*	112
Figura 6-54: A – Massa da tábua 6*; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 6*	113
Figura 6-55: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade	114
Figura 6-56: A – Humidade inicial da tábua 6; B – Humidade final da tábua 6	115
Figura 6-57: Localização das amostras e frações na tábua 6 e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %	115
Figura 6-58: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 6; B – Evolução do <i>steam content</i> na experiência 6	116
Figura 6-59: Evolução da pressão do sistema durante a experiência 6	116
Figura 6-60: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 6	117
Figura 6-61: A – Massa da tábua 6; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 6	118
Figura 6-62: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade	118
Figura 6-63: A – Humidade inicial da tábua 7; B – Humidade final da tábua 7	119
Figura 6-64: Localização das amostras e frações na tábua 7 e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %	120
Figura 6-65: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 7; B – Evolução do <i>steam content</i> na experiência 7	120
Figura 6-66: Evolução da pressão do sistema durante a experiência 7	121
Figura 6-67: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 7	121
Figura 6-68: A – Massa da tábua 7; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 7	122
Figura 6-69: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade	123
Figura 6-70: A – Humidade inicial da tábua 8; B – Humidade final da tábua 8	124
Figura 6-71: Localização das amostras e frações na tábua 8 e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %	125
Figura 6-72: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 8; B – Evolução do <i>steam content</i> na experiência 8	125
Figura 6-73: Evolução da pressão do sistema durante a experiência 8	125
Figura 6-74: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 8	126
Figura 6-75: Relação entre a pressão do sistema e humidade relativa	127
Figura 6-76: A – Massa da tábua 8; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 8	128

Figura 6-77: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade	128
Figura 6-78: A – Humidade inicial da tábua 9; B – Humidade final da tábua 9.....	129
Figura 6-79: Localização das amostras e fracções na tábua 9 e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %	130
Figura 6-80: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 9; B – Evolução do <i>steam content</i> na experiência 9	130
Figura 6-81: Evolução da pressão relativa do sistema durante a experiência 9.....	130
Figura 6-82: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 9.....	131
Figura 6-83: Evolução da humidade relativa e da pressão relativa do sistema ao longo da experiência.....	132
Figura 6-84: A – Massa da tábua 9; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 9	133
Figura 6-85: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade	133
Figura 6-86: Temperatura do sistema.....	135
Figura 6-87: Humidade e velocidade do escoamento	135
Figura 6-88: <i>Steam content</i>	135
Figura 6-89: Temperatura do sistema.....	136
Figura 6-90: Humidade e velocidade do escoamento.....	136
Figura 6-91: Pressão do sistema	136
Figura 6-92: <i>Steam content</i>	136
Figura 6-93: Comparação das humidades finais das fracções das experiências 6, 6* e 6**	137
Figura 7-1: Diferença de dimensões das tábuas, provocada pelo processo de secagem.....	139
Figura 7-2: Diferenças de dimensões em função do tipo de dimensão.....	140
Figura 7-3: Conteúdo de humidade inicial das tábuas e média global.....	140
Figura 7-4: Taxa de secagem das experiências (legenda da experiências: n.º da exp (T; P; v)).....	143
Figura 7-5: Conteúdo de humidade adimensionalizado, em função do tempo das experiências	146
Figura 7-6: Conteúdo médio de humidade (legenda da experiências: n.º da exp (T; P; v)).....	147
Figura 7-7: Conteúdo de humidade final A – da tábua, B – exceptuando as amostras A9 e A10	149
Figura 7-8: Comparação do conteúdo de humidade final com o valor de E.M.C. calculado	150
Figura 7-9: Fotografia de uma falha de corte na fracção	150
Figura 7-10: Torção de uma tábua após secagem.....	151
Figura 7-11: Colapso de uma tábua após secagem.....	151
Figura 7-12: Defeitos nos nós de uma tábua após secagem	152
Figura 7-13: Fendas nas tábuas e coloração após a secagem e imagem do pinheiro lascado	152
Figura 7-14: Coloração das tábuas devido às condições de armazenamento	152
Figura 7-15: Coloração da tábua devido à deposição de partículas resultantes da oxidação do sistema	153
Figura 7-16: Localização de cada tábua no tronco 1	153
Figura 7-17: Localização de cada tábua no tronco 2	154
Figura 7-18: Curva para determinação do consumo do ventilador para as experiências 0 a 4	155
Figura 7-19: Consumo energético das resistências e ventilador durante as experiências, em MJ	156

Figura 7-20: Consumo energético total do sistema, em MJ	156
Figura 7-21: Consumo energético das resistências e ventilador durante as experiências, em MJ.kg água removida ⁻¹	157
Figura 7-22: Consumo energético total do sistema, em MJ.kg água removida ⁻¹	157
Figura 7-23: Consumo das resistências, em kW, em função da temperatura de operação	158
Figura Anexo D - 1: Instalação de secagem.....	175
Figura Anexo D - 2: Serra mecânica para corte das amostras.....	175
Figura Anexo D - 3: Berbequim para realização dos furos para os termopares	175
Figura Anexo D - 4: Balança para pesagem das amostras	175
Figura Anexo D - 5: Estufa para secagem das amostras	175

Índice de Tabelas

Tabela 2-1: Indústria de serração de madeira	20
Tabela 2-2: Distribuição localizada da humidade da árvore.....	25
Tabela 3-1: Planeamento de secagem convencional.....	43
Tabela 4-1: Características do motor/ventilador.....	54
Tabela 4-2: Características da electroválvula de injeção de água	54
Tabela 4-3: Características do filtro/regulador e lubrificador.....	55
Tabela 4-4: Válvula de controlo de pressão	56
Tabela 4-5: Características da célula de carga.....	57
Tabela 4-6: Características do sensor de humidade e temperatura	57
Tabela 4-7: Características dos termopares	58
Tabela 4-8: Características do sensor de pressão.....	58
Tabela 5-1: Gama de valores utilizados na actividade experimental.....	66
Tabela 5-2: Factores e respectivos níveis	67
Tabela 5-3: Experiências em modo factorial	68
Tabela 5-4: Tabela de resultados em formato clássico	68
Tabela 5-5: Matriz ortogonal $L_9 (3^3)$	69
Tabela 5-6: Matriz ortogonal $L_9 (3^3)$, com os respectivos valores de utilização experimentação	69
Tabela 6-1: Condições operatórias da experiência 0	71
Tabela 6-2: Caracterização dimensional da tábua 0 [mm].....	71
Tabela 6-3: Condições operatórias da experiência 1	76
Tabela 6-4: Caracterização dimensional da tábua 1 [mm].....	77
Tabela 6-5: Condições operatórias da experiência 2*	82
Tabela 6-6: Caracterização dimensional da tábua 2* [mm].....	82
Tabela 6-7: Condições operatórias da experiência 2	87
Tabela 6-8: Caracterização dimensional da tábua 2 [mm].....	88
Tabela 6-9: Condições operatórias da experiência 3	93
Tabela 6-10: Caracterização dimensional da tábua 3 [mm].....	93
Tabela 6-11: Condições operatórias da experiência 4	98
Tabela 6-12: Caracterização dimensional da tábua 4 [mm].....	98
Tabela 6-13: Temperatura de saturação em função da pressão	102
Tabela 6-14: Condições operatórias da experiência 5	104
Tabela 6-15: Caracterização dimensional da tábua 5 [mm].....	104
Tabela 6-16: Condições operatórias da experiência 6*	110
Tabela 6-17: Caracterização dimensional da tábua 6* [mm].....	110
Tabela 6-18: Condições operatórias da experiência 6	114
Tabela 6-19: Caracterização dimensional da tábua 6 [mm].....	115

Tabela 6-20: Condições operatórias da experiência 7	119
Tabela 6-21: Caracterização dimensional da tábua 7 [mm]	119
Tabela 6-22: Condições operatórias da experiência 8	123
Tabela 6-23: Caracterização dimensional da tábua 8 [mm]	124
Tabela 6-24: Condições operatórias da experiência 9	129
Tabela 6-25: Caracterização dimensional da tábua 9 [mm]	129
Tabela 7-1: Análise qualitativa dos defeitos das tábua	151
Tabela Anexo A - 1: Dados bibliográficos sobre a secagem de madeira	168
Tabela Anexo B - 1: Tabela termodinâmica de vapor saturado – tabela de temperatura	169
Tabela Anexo B - 2: Tabela termodinâmica de vapor saturado – tabela de pressão	170
Tabela Anexo C - 1: Resumo das condições operatórias e valores obtidos em cada experiência	171
Tabela Anexo C - 2: Limpeza das tábuas por experiência	172
Tabela Anexo C - 3: Dados de injeção de água por experiência	172
Tabela Anexo C - 4: Funcionamento do contador do ventilador e das resistências por experiência.....	173
Tabela Anexo C - 5: Velocidade de ventilação por experiência	173
Tabela Anexo E - 1: Relação das peças mudadas na instalação.....	177

Lista de abreviaturas

EMC - Conteúdo em humidade de equilíbrio (*equilibrium moisture content*)

exp - Experiência

NMP - Nemátodo da madeira do pinheiro

PSF - Ponto de saturação das fibras

SC - *Steam content*

TEMA - Centro de Tecnologia Mecânica e Automação, Unidade de Investigação

Nomenclatura

a_1 e a_2	- dimensões de comprimento da tábua	[mm]
b_1 , b_2 e b_3	- dimensões de largura da tábua	[mm]
c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 e c_6	- dimensões de espessura da tábua	[mm]
$H_{t.final}$	- Humidade final da tábua (bs)	[%]
$\bar{H}_{t.final}$	- Conteúdo médio de humidade tábua no último instante de secagem (bs)	[%]
$\bar{H}_{t,i}$	- Conteúdo médio de humidade tábua num instante i (bs)	[%]
$\bar{H}_{t,i,adm}$	- Conteúdo médio adimensional de humidade tábua num instante i (bs)	[-]
$\bar{H}_{t.inicial}$	- Conteúdo médio de humidade tábua no primeiro instante de secagem (bs)	[%]
$H_{t.inicial}$	- Humidade inicial da tábua (bs)	[%]
HR	- Humidade relativa	[%]
L1	- Local na tábua, localizado na extremidade mais distante do inicio do escoamento a 12,5 mm de profundidade, onde está inserido o termopar 1	[-]
L2	- Local na tábua, localizado na superfície da madeira, onde está inserido o termopar 2	[-]
L3	- Local na tábua, localizado a 6,25 mm de profundidade, onde está inserido o termopar 3	[-]
L4	- Local na tábua, localizado no centro da tábua a 12,5 mm de profundidade, onde está inserido o termopar 4	[-]
L5	- Local na tábua, localizado na extremidade mais próxima do inicio do escoamento a 12,5 mm de profundidade, onde está inserido o termopar 5	[-]
$m_{\text{água removida}}$	- Massa de água removida da tábua	[%]
$m_{a.inicial}$	- Massa inicial da amostra	[g]
$m_{a.seca}$	- Massa da amostra depois da secagem	[g]
$m_{fr.final}$	- Massa final da fracção	[g]
$m_{fr.inicial}$	- Massa inicial da fracção	[g]
$m_{t.final}$	- Massa tábua final	[g]
$m_{t,i}$	- Massa da tábua num instante i	[g]
$m_{t.inicial}$	- Massa tábua inicial	[g]
P_T	- Pressão total	[bar]
P_{wv}	- Pressão parcial de vapor de água na atmosfera a T	[bar]
P_{sat}	- Pressão vapor saturado a T [°C]	[bar]
SC	- <i>Steam content</i> (conteúdo de vapor)	[%]
T	- Temperatura de bolbo seco	[°C]
tx_{sec}	- Taxa de secagem	[g.h ⁻¹]
$W_{f.bs}$	- Conteúdo de humidade final das fracções (madeira seca) (bs)	[%]
$W_{i.bs}$	- Conteúdo de humidade inicial das amostras (madeira verde) (bs)	[%]

1 INTRODUÇÃO

Portugal detém cerca de 3,4 milhões de hectares de floresta, que ocupam 38,4% do território nacional (CELPA, 2009), e possivelmente tem capacidade para duplicar esse valor, sendo o país europeu com a taxa mais elevada de ocupação florestal. Assim, desde cedo a floresta se tornou fonte de um material chave até ao tempo presente, com inúmeras aplicações – a madeira. Na natureza, a madeira encontra-se disponível em grandes quantidades mas geralmente com um conteúdo de humidade muito elevado. Para ser utilizada nas melhores condições, esse conteúdo de humidade deve ser substancialmente reduzido. (Martins & Araújo, 2005)

A secagem é um processo de grande importância na indústria da madeira dada a energia envolvida, o tempo de imobilização do produto e a qualidade final do mesmo. Recentemente, novos processos de secagem de madeira (infravermelhos, rádio-frequência, vácuo, etc.) têm sido analisados de forma a otimizar-se o processo. Uma das tecnologias mais promissoras para secagem de vários produtos, nomeadamente materiais cerâmicos e madeira, recorre à utilização de vapor sobreaquecido. A utilização deste fluido de secagem permite, em teoria, que se utilizem temperaturas elevadas sem colocar em risco a qualidade do produto final uma vez que, para ambientes pressurizados de vapor sobreaquecido, a humidade de equilíbrio dos materiais é superior à que se obtém com ar seco à mesma temperatura. Assim, a secagem pressurizada a alta temperatura possui o potencial de possibilitar uma secagem rápida sem provocar o desenvolvimento de tensões de secagem demasiado elevadas durante o processo. Contudo, os efeitos da variação dos parâmetros de secagem durante o processo são ainda mal conhecidos, existindo ainda algumas incertezas quanto ao efeito da pressão, temperatura e velocidade do fluido de secagem sobre o consumo energético e a duração do processo, bem como sobre a qualidade do produto final.

1.1 OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO

No seu geral, o trabalho tem como objectivo analisar e quantificar a influência da variação dos diferentes parâmetros de secagem sobre o tempo requerido para a secagem, energia consumida no processo e qualidade do produto final.

Para tal, e com recurso a uma planificação experimental adequada, serão conduzidas várias experiências na instalação experimental de secagem pressurizada a alta temperatura existente no TEMA que permitirão identificar a importância relativa de cada um destes parâmetros no processo.

Posto isto, os objectivos específicos deste trabalho são:

1. Levantamento de informação teórica e revisão bibliográfica existente sobre secagem para identificação de procedimentos experimentais e análise preliminar da influência dos vários parâmetros de secagem no processo;
2. Análise da influência dos vários parâmetros de secagem no processo, nomeadamente, temperatura, velocidade do fluido, pressão, humidade relativa;
3. Análise qualitativa dos defeitos da tábua provocados pelo processo;
4. Análise do consumo energético do processo de secagem.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

Após o capítulo introdutório (capítulo 1) é elaborada uma introdução ao papel da madeira na indústria assim como uma análise teórica à estrutura da madeira, distribuição e comportamento da humidade na madeira, no capítulo 2. São salientadas as etapas de secagem assim como a curva característica de secagem. São abordados também os factores que influenciam o processo, tanto internos como externos, terminando com uma descrição teórica dos defeitos.

No capítulo 3 é abordado o estado da arte sobre esta matéria assim como as vantagens e desvantagens do processo de secagem pressurizada com vapor sobreaquecido.

No capítulo 4 é feita uma descrição da instalação experimental especificando, contudo, as particularidades de alguns sub-sistemas da instalação importantes para o controlo e aquisição dos dados.

A descrição das tábuas de madeira utilizadas nas experiências, assim como a planificação experimental dos testes e a definição das condições operatórias pelo método de Taguchi, é efectuada no capítulo 5.

No capítulo 6 são expostos os resultados experimentais e elaborada uma análise individual desses resultados. Já no capítulo 7 é efectuada uma análise global de resultados, comparando-os entre experiências e relacionando-os com as condições operatórias.

Por fim, no capítulo 8 é elaborada uma conclusão, respondendo aos objectivos propostos neste trabalho.

2 MADEIRA

2.1 MADEIRA DE *PINUS PINASTER* NA INDÚSTRIA

A superfície mundial ocupada pelo *Pinus pinaster* está estimada em cerca de 4,4 milhões de hectares, dos quais 4,2 milhões se localizam na área de distribuição natural da espécie (Espanha, Portugal, França, Marrocos, Itália). Por outro lado, 200 000 hectares encontram-se em outras áreas de reflorestação (Austrália, África do Sul, Nova Zelândia, Chile, Argentina e Uruguai), como se pode observar na Figura 2-1.

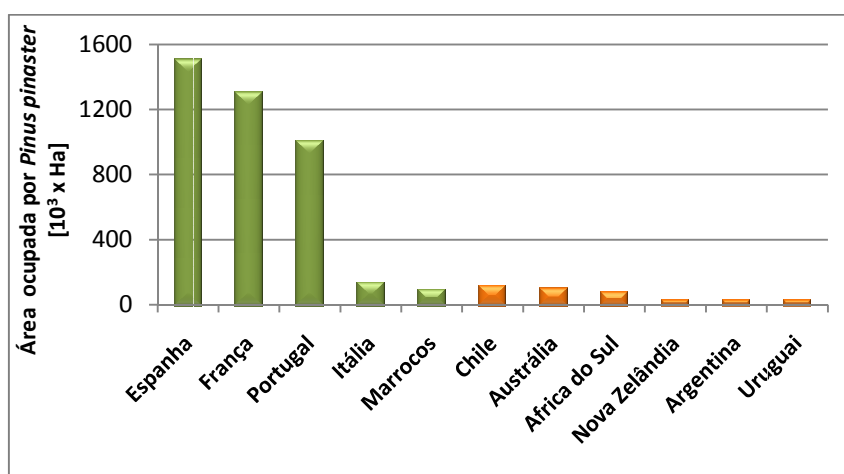


Figura 2-1: Ocupação territorial de *Pinus pinaster*

(adaptado de: Luc Rauscent. “*Le pin maritime en bois d’œuvre: Situation et perspectives*” (1999), IFN 3ª Revisão (Portugal) em <http://www.atlanwood.org/manual.php>)

Esta matéria prima tem alimentado uma das indústrias mais importantes na transformação da madeira, como é a indústria de serração, não só pelo seu elevado nível de consumo de matéria-prima mas também pela sua incidência como fonte de abastecimento de produtos e subprodutos destinados a outros subsectores (2ª transformação, painéis, etc.).

Em Portugal, Galiza e Aquitânia, os abates de madeira de *Pinus pinaster* atingem 14,6 milhões de m^3 , o que representa cerca de 60 % da madeira destinada a usos industriais nesta área. A Aquitânia é a região onde se atinge uma maior produção (9,1 milhões de m^3), seguida por Portugal (3,1 milhões de m^3) e pela Galiza (2,4 milhões de m^3).

A primeira transformação do *Pinus pinaster* baseia-se fundamentalmente na produção de madeira serrada (com um consumo próximo dos 10 milhões de metros cúbicos de madeira em toro com casca), assim como na indústria de trituração (painéis e pasta de celulose) (Figura 2-2).

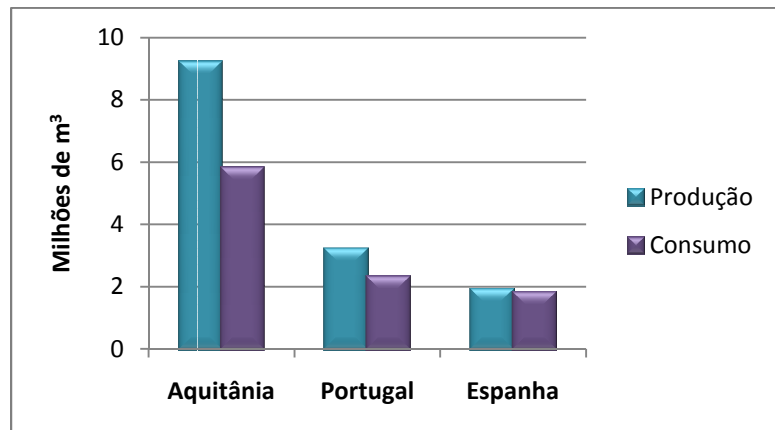


Figura 2-2: Produção e consumo de madeira *Pinus pinaster*

(adaptado de: CIS-Madeira 2001 (Galiza), FIBA 2002 (Aquitânia), AIMMP 2001 (Portugal) em <http://www.atlanwood.org/manual.php>)

Como se pode verificar pela Tabela 2-1, a indústria da serração de *Pinus pinaster* ocupa grande parte da indústria de serração nestes três locais.

Tabela 2-1: Indústria de serração de madeira

(adaptado de: CIS- Madeira 1999 (Galiza), FIBA 2001 (Aquitânia), AIMMP 2001 (Portugal) em <http://www.atlanwood.org/manual.php>)

	Aquitânia	Portugal	Galiza
N.º de serrações	273	350	365(*)
N.º de trabalhadores	2500	6300	4000
Facturação (M€)	330	469	180
Produção total de madeira serrada (m³)	2 070 600	1 552 500	1 200 000
Madeira serrada de <i>Pinus pinaster</i> (m³)	1 756 800 (85%)	1 051 500 (68%)	750 000 (62%)

(*) A. Babío, 2006

Um aspecto de grande interesse é dado pela configuração da oferta de produtos desenvolvidos a partir da madeira de *Pinus pinaster*. As diferenças são notáveis, destacando-se a importância do sector mobiliário e carpintaria em Portugal.

No caso de Portugal, cabe sobretudo destacar a importante quantidade de madeira utilizada em aplicações de elevado valor acrescentado como a carpintaria e mobiliário (24%). Quantitativamente, a produção de paletes e embalagens de madeira juntamente com as aplicações de construção civil (cofragens, etc.), constituem os principais destinos da madeira serrada de *Pinus pinaster*. Também é significativa a quantidade de madeira destinada à fabricação de postes, varas e vedações.

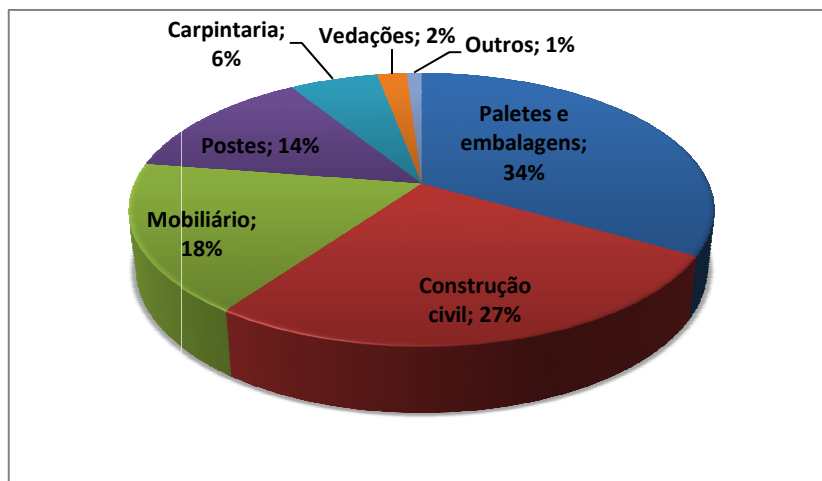


Figura 2-3: Distribuição da aplicação de madeira *Pinus pinaster*
(adaptado de: AIMMP 2001 (Portugal) em <http://www.atlanwood.org/manual.php>)

2.2 ESTRUTURA DA MADEIRA

A madeira como material pode ser definida como sendo um composto polimérico celular de baixa densidade. Mantém-se como sendo um dos materiais mais interessantes devido ao seu elevado desempenho em termos de resistência e baixo custo (Dinwoodie, 1981).

No que respeita à estrutura da madeira, existem diferenças consoante a origem da árvore.

Geralmente, qualquer que seja a espécie de árvore, o crescimento dá-se sempre pela sobreposição de camadas sucessivas, concêntricas e periféricas. Este crescimento designa-se por anel de crescimento e varia conforme a localização das árvores nas várias regiões do globo. Durante o seu processo de evolução os anéis de crescimento mais antigos vão sendo substituídos pelos mais novos, deixando os primeiros de participar no armazenamento e transporte das substâncias químicas que alimentam a árvore (Martins & Vieira, 2004). Na Figura 2-4 pode-se observar um corte da secção transversal de uma árvore.

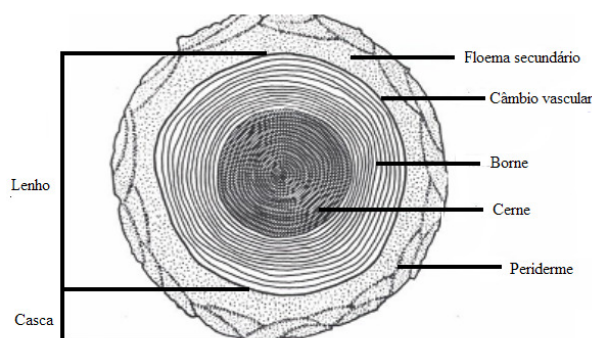


Figura 2-4: Secção transversal do tronco de uma árvore, mostrando as principais componentes do lenho e da casca

(adaptado de: Martins & Vieira, 2004)

A casca é a primeira camada exterior. Protege o lenho e é o veículo de condução da seiva elaborada das folhas para o lenho do tronco (seiva descendente). É formada por duas camadas: um estrato externo e epidérmico, formado por tecido morto, denominado por ritidioma e outro interno, formado por tecido vivo, mole e húmido, portanto com actividade fisiológica e condutor de seiva elaborada, denominado entrecasco.

O câmbio vascular consiste numa fina e quase invisível camada de tecidos vivos, situado entre a casca e o lenho. É constituído por um tecido de células em permanente transformação. No câmbio realiza-se a importante transformação dos açúcares e amidos em celulose e lenhina, principais constituintes do tecido lenhoso. O crescimento transversal verifica-se pela adição de novas camadas concêntricas e periféricas provenientes dessa transformação no câmbio: os anéis de crescimento.

O lenho é o núcleo de sustentação e resistência das árvores e é pela sua parte viva que sobe a seiva bruta. O lenho constitui a secção útil do tronco para obtenção, por abate e preparo, das peças estruturais de madeira natural ou madeira para construção.

Em quase todas as espécies o lenho apresenta-se com duas zonas bem contrastadas: o borne e cerne. O borne (externo) tem cor mais clara e é formado por células vivas e activas. Além da função resistente, é condutor de seiva bruta, por ascensão capilar, desde as raízes até à copa. O cerne (interno), de cor mais escura, é formado por células mortas. As alterações no borne vão formando e ampliando o cerne. As alterações progressivas são processos de engrossamento crescente das paredes celulares, provocados por sucessivas impregnações de lenhina, resinas e corantes. Em consequência, o cerne adquire maior densidade, compacidade, resistência mecânica e principalmente, maior durabilidade, pois sendo constituído de tecido morto, sem seiva, amido ou açúcares, não atrai insectos nem outros agentes de deterioração (Uriartt, 1992; LNEC, 1955).

Os raios lenhosos são um conjunto de células lenhosas transversais radiais cuja principal função é o transporte e armazenamento de nutrientes. Estes componentes são de toda a importância na extracção e serração das madeiras, visto que estas operações deverão ser efectuadas de maneira a que os veios fiquem sempre paralelos ao plano do corte. Se este aspecto não for tido em conta, dá origem a que se reduza significativamente a resistência da madeira, o que torna praticamente impossível obter uma peça de dimensão e qualidade aceitáveis (Martins & Vieira, 2004).

Do solo, recolhido através dos pêlos absorventes das raízes, provém principalmente a água que contém, em solução, compostos minerais, e que constitui a seiva bruta (Uriartt, 1992; LNEC, 1955).

Importa referir ainda que os anéis de crescimento permitem conhecer não só a idade de uma árvore como também estudar a característica da anisotropia da madeira, propriedade física que depende da direcção segundo a qual é avaliada. A avaliação da qualidade da madeira pode ser feita através do desempenho físico e mecânico dos anéis de crescimento, segundo três direcções possíveis: a direcção tangencial, a direcção radial e a direcção transversal, tal como se representa na Figura 2-5 (Martins & Vieira, 2004).



Figura 2-5: Direcções consideradas
(extraído de: LNEC, 1955)

2.3 HUMIDADE NA MADEIRA

A madeira é um tecido vegetal constituído por células de vários tamanhos e formatos que são compostas maioritariamente por celulose e lenhina. A humidade na madeira verde está presente de duas formas: ‘humidade livre’ nas cavidades celulares e ‘humidade de ligação’ associada às paredes celulares. A primeira é mais facilmente removida, passando de uma célula para a outra até atingir a superfície externa. A humidade de ligação mantém-se unida às paredes celulares, sendo necessária maior quantidade de energia para a remover. Esta fase é bastante mais lenta que a fase de remoção da água livre (Costa, 2006).

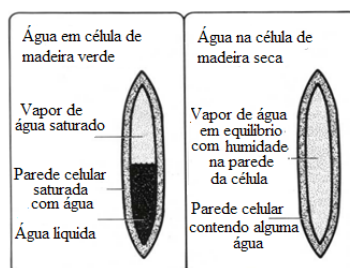


Figura 2-6: Formas de humidade na madeira
(adaptado de: Oliveira, 2005)

A humidade livre na árvore em crescimento é geralmente referida como seiva (Pratt, 1986).

A madeira possui naturalmente um teor em água muito superior ao que deve apresentar nas suas condições normais de utilização. Assim, a humidade da madeira verde pode chegar a ser superior a

100% (em base seca). A figura seguinte oferece uma referência sobre os níveis finais que correspondem a utilizações de exterior e interior (<http://www.atlanwood.org/manual.php>).

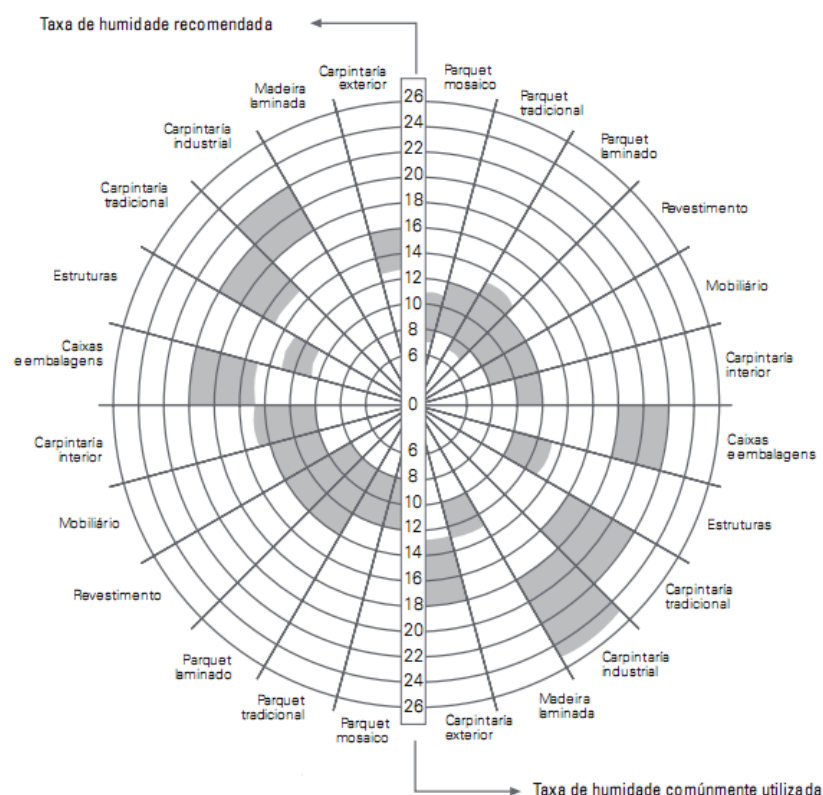


Figura 2-7: Níveis finais umidade de referência

(adaptado de: Le séchage des résineux. CTBA em <http://www.atlanwood.org/manual.php>)

Quando a madeira é seca a umidade livre nas cavidades celulares é a primeira a sair; movendo-se até à superfície e evaporando-se de seguida, geralmente sem qualquer efeito adverso na madeira, verificando-se apenas uma redução no peso da tábu. Quando as células já não contêm umidade livre na madeira é referido que a madeira está no ponto de saturação das fibras (PSF) (Pratt, 1986).

Continuando a secagem para além deste ponto, a umidade começa a deixar as paredes celulares, começando a verificar-se contracção da madeira. Dependendo da espécie, isto ocorre quando 25 a 35% da umidade da madeira ainda está por remover durante a secagem. Por razões práticas, o PSF é geralmente considerado a 30% do conteúdo de umidade mas a verdade é que as várias partes de uma mesma tábu não atingem o PSF ao mesmo tempo; irá haver variações no conteúdo em umidade numa mesma tábu e entre as tábuas de uma mesma pilha. Isto não acontece assim tão facilmente nas fases iniciais do processo e por esse motivo é que se desenvolvem tensões (Brown, 1988).

Durante a contracção, pode-se desenvolver tensões no interior da madeira e se estes se agravarem podem provocar uma série de defeitos na madeira, como se irá ver mais à frente, na secção 2.5 (Pratt, 1986).

Como a maioria da madeira é usada na forma seca, necessita de passar pelo processo de secagem antes de ser usada caso contrário irá contrair e possivelmente distorcer quando está a ser utilizada perdendo água para o ambiente circundante. A quantidade de água na madeira aumenta e diminui conforme as variações de temperatura e humidade, sendo que, assim, não é possível prevenir a expansão e contracção da madeira durante o uso. Contudo, isto pode ser minimizado pela secagem da madeira o que a irá por em equilíbrio com o ambiente circundante. A secagem é importante também por outras razões. À humidade abaixo do ponto de saturação das fibras a maioria das propriedades de resistência das fibras melhoram e abaixo de 20% de conteúdo de humidade já não fica susceptível de ataques fúngicos. Adicionalmente, a baixos conteúdos de humidade, a madeira é mais facilmente manuseada (Pratt, 1986).

Torna-se pertinente portanto, referir como se processa a movimentação da água na madeira.

A água move-se no interior da madeira sob a forma líquida ou de vapor e a sua velocidade de movimentação depende basicamente da temperatura interna e externa da madeira. Movimenta-se através de vários tipos de passagens tais como cavidades das fibras e vasos, células radiais, aberturas e ductos de resina e outros. A humidade pode deslocar-se praticamente em qualquer direcção, tanto lateral quanto longitudinalmente. Se a superfície atingir o PSF sem que o mesmo aconteça no seu interior poderão ocorrer fendas na superfície e extremos desta peça de madeira. Enquanto a madeira está a secar, diversas forças agem na movimentação da humidade no seu interior, tais como:

- Acção da capilaridade: movimenta a água livre através das cavidades das células e pequenas aberturas na parede celular;
- Diferenças de humidade no interior da madeira: estabelecem gradientes de humidade que movimentam o vapor de água por difusão;
- Diferenças no teor de humidade: movimentam a água de ligação através de pequenas passagens nas paredes celulares, também por difusão (Klitzke, 2009).

O conteúdo de humidade varia tanto com a espécie como com os tecidos da árvore, como se pode verificar pela seguinte tabela:

Tabela 2-2: Distribuição localizada da humidade da árvore
(adaptado de: Oliveira, 2005)

	Borne	Cerne
Generalidade	+	-
Madeiras duras (ex. carvalho)	-	+
Madeiras macias (ex. choupo)	+	-
Resinosas	+++	-

Como se pode observar, na generalidade dos tipos de árvores, é o borne que tem maior conteúdo em humidade, sendo que, no entanto, isso já não se verifica nas ditas madeiras duras (ou *hardwoods*), cujo cerne contém maior conteúdo de humidade que o borne.

A madeira é um material higroscópico e o seu conteúdo em humidade terá sempre a tendência de se alterar até atingir o equilíbrio com a quantidade de vapor que existe no ambiente circundante. Assim, para qualquer combinação de temperatura do ar e humidade relativa existe um conteúdo de humidade em equilíbrio (EMC) correspondente. Quanto maior for a temperatura, ou menor for a humidade relativa, menor será o EMC (Pratt, 1986). Estas relações podem ser verificadas, observando a Figura 2-8.

O conceito de humidade relativa pode ser estendido a atmosferas de vapor sobreaquecido a temperaturas acima do ponto de ebulição da água. Se definir a humidade relativa (em %) de um determinado ambiente de secagem, HR, por:

$$HR = \frac{P_{wv}}{P_0} \times 100$$

onde P_{wv} é a pressão parcial de vapor de água na atmosfera a T [°C], P_0 a pressão de vapor saturado a T [°C], e T a temperatura de bolbo seco.

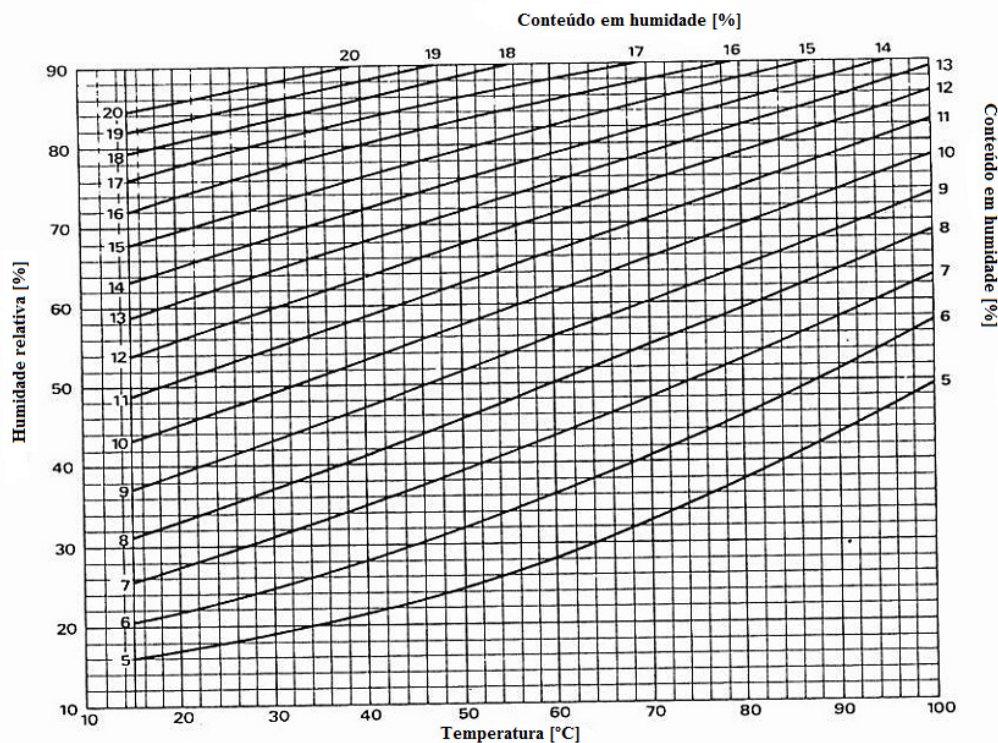


Figura 2-8: Relação entre o conteúdo de humidade da madeira, temperatura e humidade relativa do ar à pressão atmosférica
(adaptado de: Dinwoodie, 1981)

O conceito de conteúdo em vapor é particularmente útil para a determinação de mudanças quando uma atmosfera de dada composição é aquecida acima de 100°C

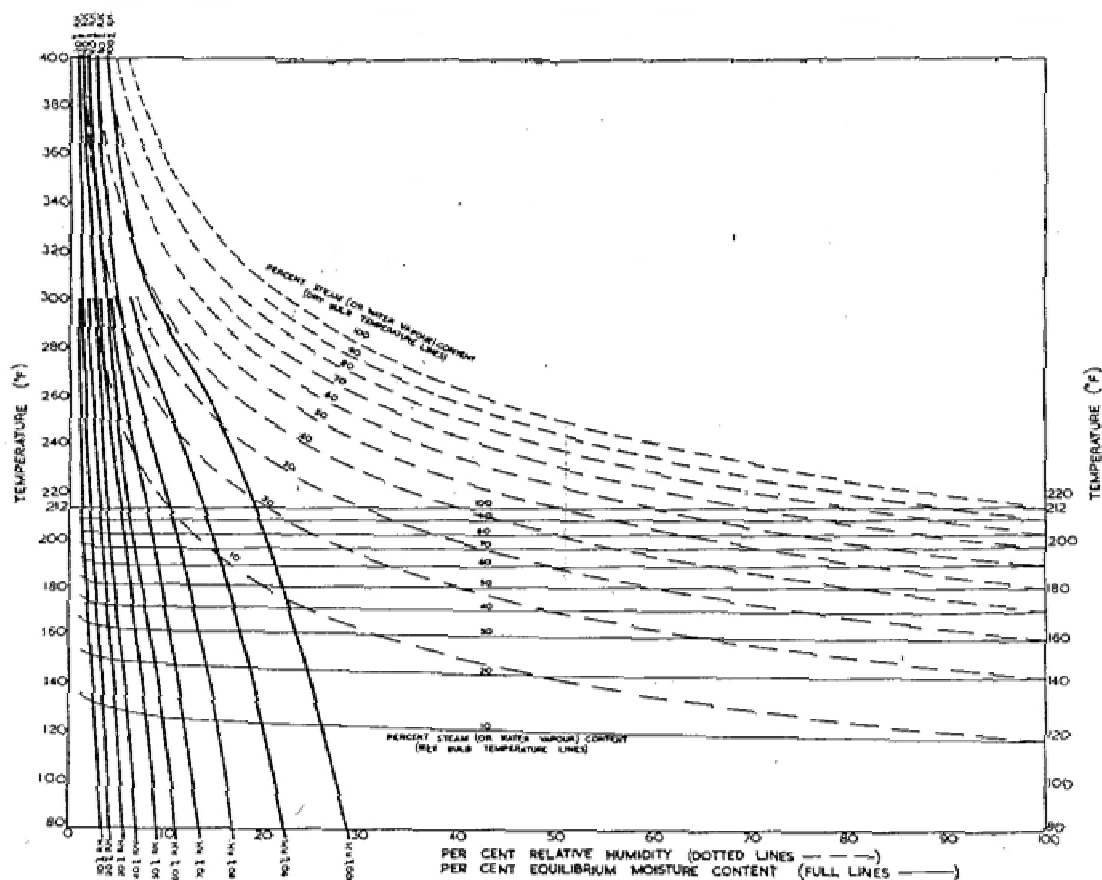


Figura 2-9: Conteúdo de humidade de equilíbrio da madeira e conteúdo de vapor da atmosfera em vapor sobreaquecido puro e misturas de ar e vapor sobreaquecido (à pressão atmosférica)

(extraído de: Kauman, 1956)

Da observação da Figura 2-9, considerando, por exemplo, uma atmosfera de vapor saturado puro a 100°C, a pressão parcial do vapor de água iguala a pressão normal atmosférica e, por isso, o conteúdo em vapor é de 100%. Agora se esta atmosfera se encontrar a temperatura superior a 100°C, mantendo contudo a pressão a 1 atm (por meio de uma válvula de segurança), o vapor torna-se imediatamente sobreaquecido e a humidade relativa diminui como mostrado pela linha do conteúdo de vapor a 100%. Desde que a pressão permaneça a uma atmosfera e a temperatura acima dos 100°C, o vapor é necessariamente sobreaquecido, e a linha do conteúdo de vapor a 100% dá o máximo de humidade relativa que pode existir a cada temperatura.

Do mesmo modo, se o aquecimento começa desde 100°C, com uma atmosfera com 90% de humidade relativa em vez de vapor puro, e mantendo-se igualmente a pressão a 1 atm, então a humidade relativa a qualquer temperatura é calculada seguindo a linha de 90% de conteúdo em vapor, assim como 80% em conteúdo de vapor corresponde 80% de humidade relativa, a 100°C. Deve ser notado que as linhas de temperatura de bolbo seco e bolbo húmido a qualquer conteúdo

em vapor encontram-se na linha de 100% de humidade relativa à temperatura correspondente ao ponto de orvalho.

A Figura 2-9 também mostra valores de EMC a humidades relativas constantes para temperaturas até 200°C (eixo horizontal) e temperaturas de bolbo húmido para vários conteúdos em vapor (eixo vertical). É geralmente considerado que a pressão total não afecta significativamente a dependência do EMC da temperatura e humidade relativa; apenas limita o valor máximo de EMC que pode ser alcançado a temperaturas acima do ponto de ebulição da água. No entanto, quando se opera a condições de pressão diferentes da pressão atmosférica verifica-se que quer o EMC quer a humidade relativa aumentam com a pressão.

A Figura 2-10 relaciona o EMC com diferentes valores de pressão.

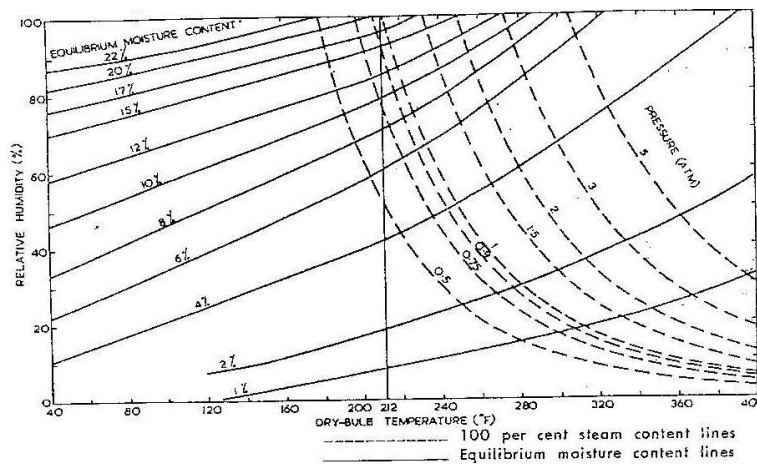


Figura 2-10: Conteúdo de humidade de equilíbrio da madeira e conteúdo em vapor a diferentes pressões

(extraído de: Kauman, 1956)

Quando se opera a 2 atm (absoluta) a água evapora a 120°C e a linha de 100% de conteúdo em vapor move-se cerca de 2°C para cima. Na Figura 2-9, as linhas correspondentes teriam que ser todas recalculadas. A temperatura de bolbo húmido para uma atmosfera de vapor sobreaquecido puro a esta pressão seria 120°C. Para uma dada temperatura de bolbo seco, é possível obter um EMC mais elevado do que a pressão normal atmosférica. A 120°C e 1 atm, por exemplo, o EMC para conteúdos de 100% de vapor é cerca de 4 % (máximo possível para estas condições); para a mesma temperatura e 2 atm, o EMC é cerca de 15%. Similarmente a humidade relativa a 120°C e a pressão atmosférica seria de 50% mas a 2 atm aumentaria para 98% (Kauman, 1956).

2.4 PROCESSO DE SECAGEM

O mecanismo de secagem da madeira pode ser explicado a partir de dois pontos: (1) a evaporação da água das camadas superficiais da madeira, que é absorvida pela atmosfera; e (2) a

movimentação da água das camadas internas da madeira para as camadas mais externas, até atingir a superfície. Estes dois pontos não ocorrem de modo simultâneo e também não se encontram sob a influência dos mesmos factores. Desta forma pode-se dizer que a diferença entre a velocidade de evaporação da humidade superficial da madeira e a velocidade de difusão da humidade interna ocasionam a maioria dos defeitos nas peças de madeira. Assim, se a perda da humidade superficial for mais rápida que a difusão interna da humidade, teremos uma secagem ineficaz, com aparecimento de defeitos. Desta forma, ao efectuar a secagem de madeira que apresente uma humidade:

- acima do PSF, o movimento da água livre seguirá em geral as leis capilares, ou seja, quanto menor for o diâmetro dos capilares, maior será a força de tracção da coluna de água nestes capilares. Pode então, surgir defeitos durante a secagem;
- abaixo do PSF a secagem é considerada geralmente como sendo um processo de difusão, ou seja, a água das camadas mais internas difundem-se na forma de vapor preenchendo os espaços vazios deixados pela água livre, até atingirem a superfície da madeira por capilaridade.

Desta forma, a secagem da madeira pode ser considerada como sendo um processo físico constituído por movimentos capilares e difusão de vapor de água (Costa, 2006).

Segundo Kollman & Cotê (1968), Rosen (1983) e Jankowsky (1995), durante o processo de secagem por convecção ocorrem três fases ou estágios distintos (Figura 2-11).

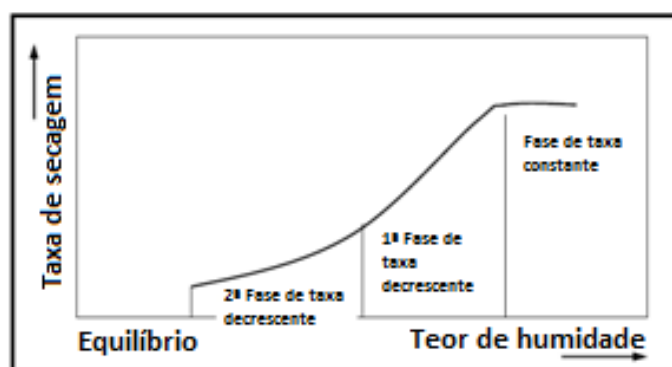


Figura 2-11: Curva característica de secagem para materiais porosos

(adaptado de: Rosen, 1983)

A primeira fase ocorre a taxa de secagem constante, com movimentação da água livre até à superfície, provocada pelas forças de capilaridade. Pela superfície ocorre o deslocamento de uma corrente de ar caracterizando uma secagem por convecção. A energia (calor sensível) da corrente de ar é transferida para a superfície da madeira, promovendo a evaporação da água ali existente e que, no estado de vapor, é transferida para a corrente de ar.

No momento em que as restrições ao fluxo capilar impedem que a água livre alcance a superfície da madeira, o teor de humidade nessa região atinge o PSF, caracterizando o início da primeira fase de taxa decrescente. A madeira atinge um teor de humidade no qual a frente de secagem da água se desloca em direcção ao centro da peça. A evaporação da água presente na superfície gerará um gradiente de humidade principalmente no sentido da espessura, dando início à movimentação da água do interior até à superfície por difusão, a qual também é influenciada pelo fluxo de calor que ocorre no sentido inverso. A movimentação interna da água ocorre nas fases de líquido, vapor e como água de ligação (quimicamente ligada aos componentes da parede celular). Na fase líquida a movimentação é fundamentalmente um fenómeno de capilaridade, sendo afectada pela estrutura anatómica da madeira. A movimentação nas outras fases é basicamente um fenómeno difusivo, afectado não só pelas condições termodinâmicas da corrente de ar como também por características da própria madeira, tornando-se, esta última, significativa no controlo da taxa de secagem.

No estágio final (segunda fase da taxa decrescente), iniciado quando a frente de secagem da água se restringe ao centro da peça, não há mais água livre na madeira e a taxa de secagem é regulada pelas características do material, até que o teor de humidade em equilíbrio seja alcançado.

Existem alguns factores que influenciam a taxa de secagem da madeira. Estes factores podem ser tanto internos, relacionados com própria madeira, como externos, relacionados com condições atmosféricas. Nos factores internos pode-se destacar (Costa, 2006):

- espécie da madeira: algumas madeiras secam mais rapidamente que outras, em função da sua estrutura anatómica. Algumas espécies possuem vasos mais largos e abertos ou então mais abundantes do que em outras espécies, favorecendo com isso, a circulação da humidade no seu interior e, consequentemente, a taxa de secagem.
- tipo de madeira: peças com maior quantidade de borne em geral secam mais rapidamente do que as que apresentam maior quantidade de cerne. Assim como peças de madeira que possuam anéis de crescimento mais largos e ricos em lenho primaveril, apresentam maior velocidade de secagem do que a mesma espécie com anéis de crescimento finos e ricos em lenho juvenil.
- teor de humidade inicial: uma determinada espécie de madeira poderá apresentar diferentes taxas de secagem. Estas diferenças dependem do teor de humidade inicial da madeira. Uma peça com teor de humidade inicial baixo levará um menor tempo para secar em relação a outra com um teor de humidade inicial mais elevado.
- orientação do corte: o fluxo ou movimentação da humidade no interior da madeira chega a ser 10 a 15 vezes superior no sentido longitudinal do que no transversal. Já no sentido

transversal, esta movimentação chega a ser 20 a 50% superior no sentido radial em relação ao sentido tangencial.

- cerne e borne: em geral, o borne seca mais rapidamente que o cerne, apesar de possuir um teor de humidade mais elevado. Isto deve-se à sua alta permeabilidade em relação ao cerne.
- massa específica: quanto maior a massa específica, maior o tempo de secagem.
- espessura da tábuas: a maior espessura das peças resulta num aumento do peso sem alterar, significativamente, a área superficial para a evaporação da água. Consequentemente, uma maior espessura implica menores taxas de secagem, pois deverá ser removida uma maior quantidade de água até o teor de humidade final desejado (Galvão & Jankowsky, 1985).
- outros factores: a presença de fungos que mancham e/ou apodrecem a madeira dificultam o movimento da água no interior da madeira, pois bloqueiam a passagem da água. Além disso, a presença de resinas e outros extrativos, dificultam a movimentação de água e com isso aumentam o tempo de secagem da madeira.

Relativamente aos factores externos, tem-se (Costa, 2006):

- temperatura: de maneira geral, quanto maior for a temperatura, maior será a velocidade de secagem. Entretanto, neste ponto, deve ser observado dois aspectos fundamentais. O primeiro relacionado a remoção da água livre, a qual não necessita de elevadas temperaturas, pois o seu efeito não influirá significativamente sobre a taxa de secagem. O segundo aspecto diz respeito a retirada da água de ligação (abaixo do PSF), a qual será influenciada directamente pela temperatura. O aumento da temperatura provocará uma alteração na humidade relativa do ar, acelerando o processo de difusão, responsável directo pelo aumento da taxa de secagem. A temperatura do ar, sendo superior à da madeira, permitirá que ocorra transferência da energia para a madeira, favorecendo desta forma, a difusão e capilaridade e consequentemente, a evaporação da água. O aumento da temperatura influencia a humidade relativa do ar, provocando um aumento de pressão de saturação do vapor de água. Desta forma, o ar poderá absorver mais vapor de água extraído da superfície da madeira. Na secagem artificial podem ser distinguidos dois tipos básicos de temperatura: temperatura de bolbo seco, que fornece a temperatura do ar no interior do secador; e temperatura de bolbo húmido, que possibilita calcular a humidade relativa do ar no interior da estação de secagem e a humidade de equilíbrio da madeira. Keylwerth (1952) mencionou que, no processo de secagem a alta temperatura, a temperatura interna da madeira aproxima-se da temperatura de bolbo húmido quando o teor de humidade é superior ao PSF. Quando a humidade superficial decresce abaixo deste ponto, o aumento da temperatura superficial é seguido por um aumento da temperatura interna devido ao

gradiente formado entre a superfície e o centro da madeira. Apenas quando o teor de humidade do centro decresce abaixo do PSF, ocorrerá grande aumento da temperatura interna. Tais observações levaram o autor a duas conclusões: a) quando o teor de humidade está acima do PSF, a razão entre a temperatura da madeira e o bolbo húmido permanece aproximadamente unitária; b) quando o teor de humidade do centro da madeira decresce abaixo do PSF, a razão tende a aumentar para valores superiores à unidade, uma vez que a temperatura interna tende a aumentar substancialmente.

- humidade relativa do ar: Quanto mais baixa for a humidade relativa do ar, mais humidade este poderá absorver da superfície da madeira, favorecendo a taxa de secagem. A humidade relativa do ar está relacionada com dois factores: a capacidade do ar em receber maior ou menor quantidade de vapor de água e com a maior ou menor remoção da água das camadas superficiais da madeira. O controlo da humidade relativa do ar dentro do sistema pode ser feito através de quatro diferentes maneiras: através do sistema de aquecimento, através do fornecimento de vapor, através da admissão de ar seco e frio do ambiente externo e através da eliminação do ar húmido e quente do interior do sistema.
- ventilação: durante o processo de secagem, o ar seco que entra no sistema absorve a humidade da madeira. Caso este ar não circule, ele tenderá a entrar em equilíbrio com a madeira, e o processo de secagem estabilizará. As finalidades básicas da circulação do ar no interior do sistema são: (1) transferência de calor do sistema de aquecimento para o compartimento de secagem; (2) distribuição de calor de maneira uniforme sobre todo este compartimento; (3) misturar e condicionar o ar antes da sua passagem pela madeira; e (4) remover a água da superfície da madeira. Além disso, a circulação do ar pode ser feita de duas formas, a circulação natural, que se fundamenta no princípio de que o ar quente sobe e o ar frio desce, sendo que, desta forma, uma correcta localização e controlo das aberturas para entrada de ar seco e frio, bem como do ar quente e húmido, podem proporcionar uma adequada circulação do ar e a circulação forçada, a qual pode ser obtida através de ventiladores de ar, podendo atingir velocidades mais elevadas. De um modo geral, por exemplo, quanto maior for a espessura da madeira, menos vantajoso será, do ponto de vista económico, o aumento da velocidade do ar.

2.5 DEFEITOS DE SECAGEM NA MADEIRA

A madeira, sendo um produto natural, raramente está livre de defeitos e zonas danificadas que tendem a baixar o seu valor económico. Estes podem ser defeitos naturais ou provocados por processos industriais, como é o caso de secagem (Desch & Dinwoodie, 1981)

A degradação na secagem é condicionada por dois tipos de factores. O primeiro tipo está relacionado com os parâmetros de secagem, tais como, temperatura, humidade, pressão, velocidade do fluido, tempo de secagem. Já o segundo tipo está relacionado com factores externos tais como, condicionantes de serração, espécies, estrutura, dimensão, etc. (Silva, 1992).

A Figura 2-12 sumariza a ocorrência cronológica de defeitos de secagem e as formas como cada qual pode afectar o produto final:

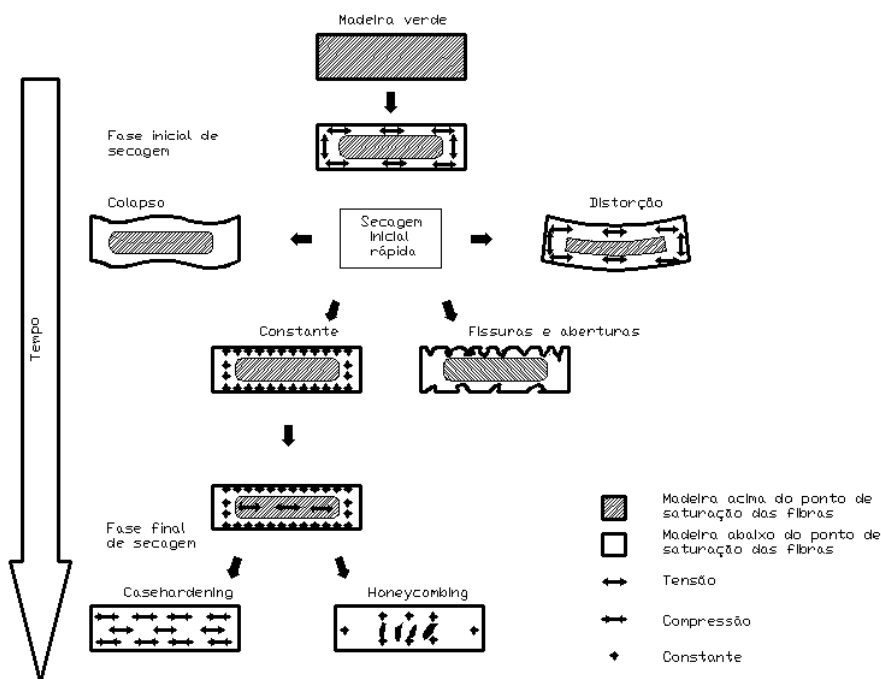


Figura 2-12: Ocorrência cronológica de defeitos de secagem
(adaptado de: Pratt, 1986)

A probabilidade de se verificar certos tipos de defeitos depende da zona de corte da tábua em relação ao tronco da árvore (Figura 2-13):

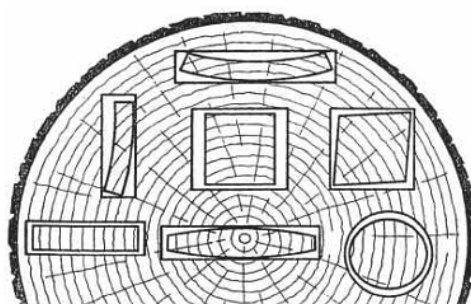


Figura 2-13: Relação entre defeitos e zona de corte para a tábua
(extraído de: Lança, 2005)

Como se pode observar, a localização da tábua no tronco da árvore, influenciada pela orientação dos veios, irá afectar o tipo de defeito que poderá ocorrer.

Os defeitos mais comuns na secagem de madeira serão descritos nos pontos seguintes.

2.5.1 FENDAS (SURFACE CHECKING) E ABERTURAS (SPLITTING)

O processo de secagem depende da evolução do gradiente de humidade ao longo da tábua. Contudo, muitos defeitos de secagem podem ocorrer quando este gradiente aumenta abruptamente (Pratt, 1986). Durante a secagem, a superfície da tábua atinge o ponto de saturação das fibras antes da zona interna, a água molecular tende a abandonar a superfície e as zonas mais exteriores tendem a contrair. Como o interior da madeira ainda não atingiu o ponto de saturação das fibras, alguma humidade livre ainda ocupa os espaços entre as células (Silva, 1992). O gradiente que pode ser tolerado depende da espécie da madeira mas, se houver diferenças significativas nas forças de contracção na superfície e nas tensões que se desenvolvem ao longo da peça, as fibras na camada superficial de secagem podem separar-se e ocorrer fendas e aberturas.

Como a contracção na direcção dos anéis de crescimento é maior do que na direcção perpendicular, torna-se mais provável de ocorrer fendas nas faces tangenciais ao corte e nas extremidades da tábua, usualmente ao longo dos raios, onde a humidade move-se com maior facilidade na direcção longitudinal, como se verifica na Figura 2-14.

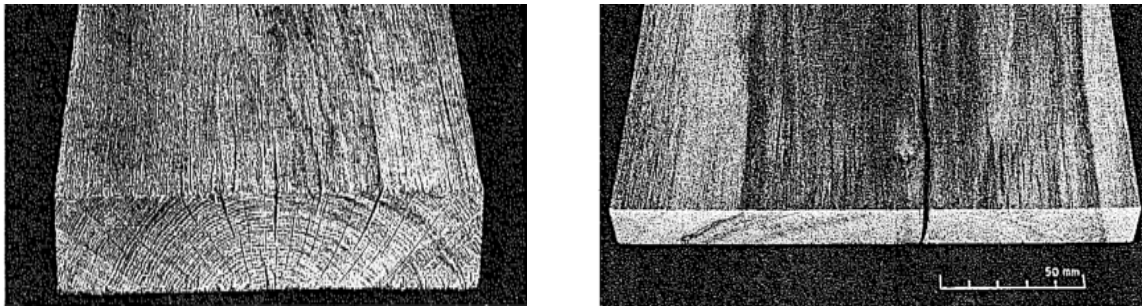


Figura 2-14: Exemplo de fendas e aberturas em tábua de madeira

(extraído de: Pratt, 1986)

A zona das extremidades tem tendência a secar e contrair antes que a secção central, o que pode levar à formação de tensões suficientes para causar aberturas (Pratt, 1986).

Uma das formas para minimizar este defeito é através do controlo das condições ambiente para prevenir a formação de gradientes acentuados de humidade (Pratt, 1986) ou caso se verifique este defeito poderá cortar-se tábuas de maiores dimensões longitudinais para que no final de secagem se retire a parte afectada, o que, no entanto, pode levar a um desperdício excessivo (Silva, 1992).

2.5.2 TORÇÃO

Quando as forças de tensão nos dois lados de superfície da tábua diferem significativamente devido à heterogeneidade natural da madeira ou a marcas de serração, poderá ocorrer contracção distinta na mesma tábua, levando a empenamento, aparecimento de curvaturas, torção em forma de taça, etc. (Silva, 1992), como se pode verificar na Figura 2-15.

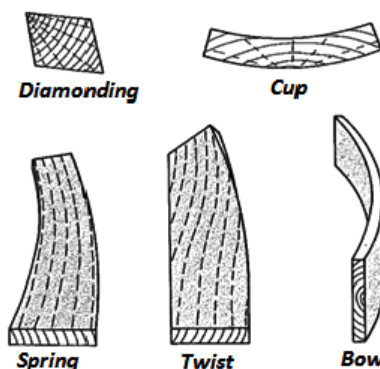


Figura 2-15: Várias formas de torção (secção transversal e longitudinal)

(extraído de: Pratt, 1986)

As distorções estão mais associadas a madeiras com os raios orientados em espiral ou interligados ou por variações na densidade da madeira. A torção em forma de taça é mais comum em tábuas de madeira planas, onde as diferenças entre o comportamento reológico das direcções tangenciais e radiais têm um papel muito importante.

Uma das opções para contrariar este defeito será proceder à secagem da madeira em carregamentos pesados para assim criar peso em cima da tábua, impedindo que esta se mova durante o processo (Silva, 1992). As temperaturas elevadas de secagem parecem aumentar a quantidade total de contracção e, por isso, é recomendada secagem a baixa temperatura (Pratt, 1986).

2.5.3 COLAPSO (COLLAPSE)

O colapso é uma forma de torção provável de ocorrer em certos tipos de madeira, como por exemplo, certas espécies de eucaliptos (Pratt, 1986).

Ao contrário de defeitos que ocorrem quando a água molecular abandona as células, o colapso ocorre quando a humidade livre deixa os espaços vazios entre as células, nas primeiras fases do processo de secagem (Silva, 1992).

É causada pela tensão superficial que se acumula à medida que a quantidade de água nas células diminui devido à influência de vários factores incluindo temperatura elevada, velocidade do ar elevada e baixa permeabilidade, fazendo com que as forças capilares excedam a resistência à compressão das paredes celulares e puxem as fibras para a parte interna da tábua (Silva, 1992) (Figura 2-16).

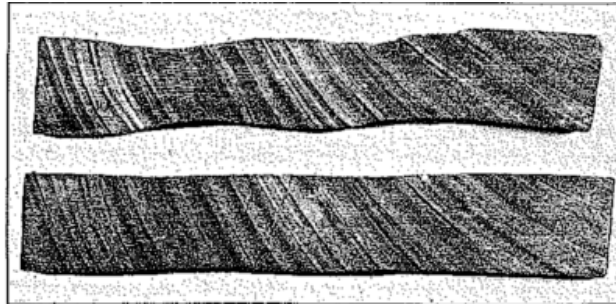


Figura 2-16: Exemplo de uma tábua colapsada e seguida do reacondicionamento

(extraído de: Pratt, 1986)

Em muitos casos, a maioria do colapso e consequente torção pode ser revertida quando a madeira quase seca for submetida a um programa a elevada temperatura e elevada humidade relativa, referido como reacondicionamento (Pratt, 1986).

2.5.4 ENDURECIMENTO (CASEHARDENING)

À medida que o processo de secagem ocorre, a água molecular é eliminada das zonas internas da tábua e o centro torna-se sujeito a contracção. As regiões internas da madeira, antes submetidas a compressão, são agora sujeitas a tensões de tracção, e as zonas externas, estão agora submetidas a compressão em virtude da contracção do interior da madeira. Se a superfície se manter sob compressão e a parte interna sob tensão até ao final da secagem, a madeira é descrita como *casehardened* (Silva, 1992).

A existência e intensidade de endurecimento pode ser verificado pelo corte seccional de cerca de 15 mm de espessura da tábua que está a ser seca e depois cortar a porção central, como mostra a Figura 2-17 (A) (Pratt, 1986):

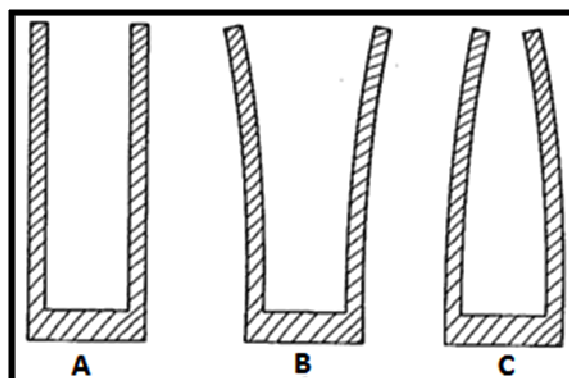


Figura 2-17: Teste para verificação de endurecimento

(extraído de: Pratt, 1986)

Nas primeiras fases de secagem, as pontas acabadas de cortar irão primeiro curvar para fora (B) mas assim que começam a secar até atingirem um conteúdo em humidade uniforme, as pontas

endireitam, indicando que a madeira examinada não foi sujeita a tensões excessivas durante a secagem. Caso as forças de tensão sejam excessivas as pontas irão curvar para o interior (C) (Pratt, 1986).

Um tratamento com humidade elevada e alta temperatura podem eliminar este defeito restaurando algum grau de plasticidade às zonas exteriores da madeira afectada, aliviando algumas tensões (Silva, 1992).

2.5.5 NINHO DE ABELHAS (*HONEYCOMBING*)

Quando o conteúdo em humidade nas regiões internas decresce abaixo do ponto de saturação das fibras, as tensões na superfície opõem-se fortemente à contracção que ocorre no interior da madeira. Se as forças de tensão forem muito fortes, as fibras irão romper e irão desenvolver-se aberturas internas num processo conhecido como ‘*honeycomb*’ (Figura 2-18).

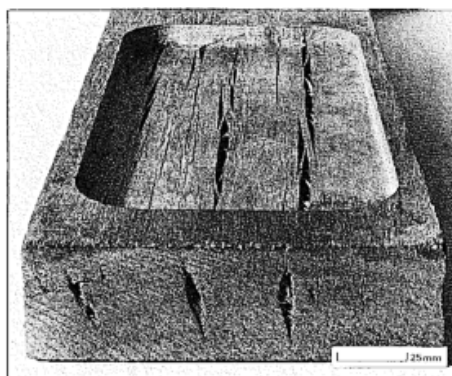


Figura 2-18: Aspecto da tábua com ninho de abelhas
(extraído de: Pratt, 1986)

Esta forma de degradação pode ser agravada se foram usadas altas temperaturas, o que tende a reduzir as propriedades de resistência e diminuir a sua capacidade de suportar tensões elevadas (Silva, 1992).

Este tipo de defeito pode ser evitado assegurando que tensões excessivas não são desenvolvidas durante a secagem (Pratt, 1986).

2.5.6 DESCOLORAÇÃO E APARECIMENTO DE MANCHAS

O aparecimento de manchas e a descoloração podem ocorrer devido à presença de fungos e bolores ou compostos químicos. Manchas causadas por fungos podem ser prevenidas evitando que a madeira seja exposta a condições húmidas e pode-se também utilizar uma temperatura mais elevada para esterilização e remoção da fonte das manchas. No entanto, pode ocorrer, pelo

contrário o escurecimento da madeira caso estejam presentes constituintes químicos, que em temperaturas elevadas, oxidam (Pratt, 1986).

Na Figura 2-19 pode-se observar um exemplo deste defeito.

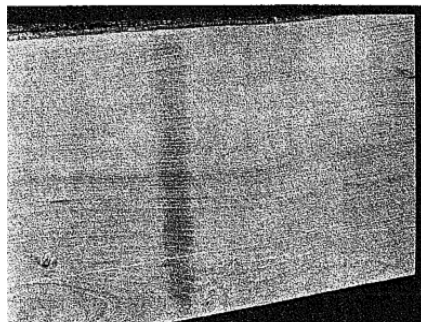


Figura 2-19: Exemplo de mancha numa tábua
(extraído de: Pratt, 1986)

2.6 NEMÁTODO DA MADEIRA DO PINHEIRO

O nemátodo da madeira do pinheiro (NMP), cujo nome científico é *Bursaphelenchus xylophilus*, é um verme microscópico que mede menos de 1,5 mm de comprimento, sendo considerado um dos organismos patogénicos mais perigosos para as coníferas a nível mundial, pois é o agente causal da doença da murchidão dos pinheiros, originando a morte das árvores afectadas.

O NMP é nativo da América do Norte, ocorrendo nos Estados Unidos e Canadá. A actividade humana provocou a sua introdução accidental em vários países do Extremo Oriente. Em 1999, o NMP foi detectado em Portugal ocorrendo nos distritos de Setúbal, Santarém e Évora. Na primavera de 2008, foi também detectado na zona centro do país, no distrito de Coimbra, não sendo por enquanto conhecida com exactidão a área total afectada.

Este verme afecta principalmente as árvores do género *Pinus* (pinheiros). Em Portugal, o NMP foi encontrado unicamente em pinheiro bravo (*P. pinaster*), embora ocorra em áreas com grande densidade de outros pinheiros, nomeadamente o pinheiro manso (*P. pinea*). Não existem sintomas específicos do ataque do NMP, embora em termos gerais se possa referir que as árvores apresentam diminuição no fluxo de resina algumas semanas após a infecção, ao que se segue a descoloração da copa e/ou seca e murchidão das agulhas, sintomas esses que aparecem a partir do meio do verão, sendo mais evidentes nos meses de outono e/ou primavera. A presença do NMP só pode ser detectada em laboratório após colheita de material lenhoso.



Figura 2-20: Aspecto de um pinheiro bravo atacado por NMP

(extraído de: images.google.pt)

Para se dispersar de uma árvore para outra, o NMP necessita ser transportado por um insecto, sendo os cerambicídeos do género *Monochamus* os vectores mais importantes a nível mundial. Uma vez no interior das árvores, os nemátodos reproduzem-se rapidamente alimentando-se das células epiteliais e do parênquima dos canais de resina, provocando o decréscimo e a paragem da produção de resina.

Em Portugal foi adoptada a Portaria 1460/2009 de 31 de Dezembro que actualiza e clarifica as disposições nacionais relativas ao tratamento de madeira e de material de embalagem de madeira e as exigências relativas à sua circulação, tendo em conta as Decisões Comunitárias entretanto publicadas (portal.min-agricultura.pt). Foi publicada também a norma portuguesa NP 4487 – Madeira serrada, *pallets* e outras embalagens de resinosas – tratamento fitossanitário pelo calor para eliminação do nemátodo da madeira do pinheiro. Face à eventual presença de NMP na madeira serrada de resinosas torna-se necessário eliminar a sua ocorrência nos produtos finais. Esta norma visa definir um conjunto de requisitos que conduzam ao controlo dos processos de tratamento para eliminação do NMP no material lenhoso.

O tratamento fitossanitário adoptado nesta norma também é válido para a eliminação do insecto vector (*Monochamus galloprovincialis*) do NMP, procurando-se deste modo salvaguardar o risco que a sua presença representaria em caso de eclosão do adulto em territórios isentos.

Para realizar este tratamento a infra-estrutura deverá apresentar um conjunto de equipamentos que capacite o agente económico a realizar em condições mínimas o tratamento fitossanitário por choque térmico: câmara de tratamento munida de uma fonte de calor, sondas de medição da temperatura e sistema automático de registo de parâmetros fundamentais ao controlo das condições de tratamento. Para se considerar tratada por choque térmico, a madeira deve ser submetida a um tratamento que garanta a temperatura mínima de 56 °C no centro da madeira a tratar, durante pelo menos 30 minutos (http://www.ipq.pt/backfiles/prNP004487_2008.pdf). Com as condições operatórias utilizadas nestas experiências práticas é possível eliminar o NMP.

3 ESTADO DE ARTE

Os métodos de secagem foram evoluindo ao longo do tempo tornando-se mais complexos mas, ao mesmo tempo, tendo em consideração a influência que o processo pode incutir na madeira, ou seja, na produção de defeitos. Assim, por se considerar importante para o desenvolvimento deste trabalho, é elaborado nesta secção, uma revisão bibliográfica de alguns trabalhos que já foram desenvolvidos.

3.1 SECAGEM DE MADEIRA AO AR LIVRE

A secagem de madeira ao ar livre é o método mais simples pelo qual a maioria da humidade em excesso pode ser removida. Neste método, a madeira é colocada em campos abertos ou com alguma cobertura, exposta a ventos que transportam calor e evaporam a humidade (Silva, 1992). No entanto, pode estar sujeita a variações de temperatura e de humidade relativa, não apenas de acordo com as mudanças sazonais mas também durante as 24 horas do dia. E ainda, desde que as condições atmosféricas em qualquer período correspondam a um conteúdo de humidade de equilíbrio para a madeira, a taxa a que a madeira irá ajustar será dependente do tempo em que essas condições se mantiverem (Brown, 1988). Assim, excluindo algum verão excepcionalmente quente e seco, o conteúdo mais baixo em humidade que se pode obter situa-se entre 16-17%. No inverno, mesmo cobrindo a madeira, o conteúdo em humidade não será menor que 22-23%, o que não é suficiente para se poder utilizar a madeira em usos interiores, onde o conteúdo em humidade deverá situar-se entre 8-12% (Pratt, 1974).

O custo da secagem ao ar, excluindo o custo de manuseamento (mão-de-obra), depende de vários factores:

1. O custo da implementação da instalação;
2. O valor do terreno;
3. O valor da madeira e o interesse económico actual;
4. As despesas gerais incluindo a desvalorização, manutenção, supervisão e seguro;
5. O tempo de secagem.

Este último é um factor imprevisível dependendo tanto das condições climáticas como do tipo e espessura da madeira. Geralmente, o tempo de secagem é demasiado longo, o que faz aumentar o custo associado ao armazenamento da madeira, implicando a imobilização de stocks (Pratt, 1974).

3.2 SECAGEM DE MADEIRA EM FORNO CONVENCIONAL

A secagem de madeira em forno é um método artificial com recurso ao calor, circulação forçada, ventilação e humidificação (Silva, 1992).

A secagem em forno é efectuada à temperatura máxima tolerada por uma determinada espécie, acelerando o movimento da humidade dentro da tábua e aumentando a taxa de evaporação, sem haver excessiva degradação da madeira. A circulação forçada assegura uma transferência de calor satisfatória, homogeneizando o calor e o conteúdo em humidade do ar de secagem e acelerando a taxa de transferência de massa e calor na superfície da madeira. Dentro do forno é mantida uma humidade constante por acção da ventilação, que elimina o excesso de humidade para o exterior. É necessário criar um ambiente húmido no interior do forno, prevenindo deste modo, a formação de defeitos na madeira provocados por transferência de massa excessiva durante o processo de secagem. No final, a madeira é submetida à acção de vapor para libertar as tensões de secagem (Silva, 1992).

Em relação à secagem ao ar livre, a secagem em forno tem a vantagem de ser mais rápida, além de se poder controlar os parâmetros operatórios como a temperatura, humidade e velocidade do ar, podendo-se secar a madeira do mesmo modo em qualquer altura do ano, não sendo influenciada pelas condições climáticas. No entanto, a secagem no forno requer uma grande quantidade de energia seja para o aquecimento ou para manter a ventilação. Este parâmetro não é usado de maneira muito eficiente uma vez que nos fornos convencionais o ar que é expelido é quente e húmido sendo repostado por ar frio, que terá de ser aquecido desperdiçando assim, energia no ar quente expelido. Apesar disso, na secagem ao ar livre, as madeiras macias têm um tempo de secagem entre os 35 a 145 dias enquanto que as madeiras duras podem demorar cerca de 160 dias a secar (TRADA, 1988).

Os fornos de secagem operam com uma humidade relativa de 40% a 90%, a velocidade do ar não excede os 3 m.s^{-1} e podem operar a baixas temperaturas, não excedendo os 50°C . Este facto trás a vantagem de poder ser usada como etapa de pré-secagem, para baixar o conteúdo em humidade (TRADA, 1988). Aliás, Rosen (1981) relata que o uso desta técnica como método de pré-secagem é mais eficiente que a secagem ao ar para madeiras refractárias. O material que passe por um processo de pré-secagem, não só seca mais rapidamente como a degradação da madeira é menos provável de ocorrer (Silva, 1992). Em adição às vantagens de secagem mais rápida e com menos defeitos, a possibilidade de controlo das condições de secagem no forno significa que é possível alcançar conteúdos em humidade na madeira específicos para determinados usos (Pratt, 1974).

Wengert (1979) referiu que os custos totais da secagem baixaram cerca de 23% com uma combinação de pré-secagem seguida de secagem no forno em vez de a secagem ao ar livre seguida

de secagem no forno. A redução de 40% dos custos de secagem é possível quando o método é comparado com a secagem no forno.

Um forno de secagem de madeira pode ser definido simplesmente como uma estrutura fechada dimensionada ou adaptada para o objectivo de reduzir o conteúdo de humidade da madeira. No entanto, este método é alvo de críticas uma vez que o aumento da temperatura leva a quedas na humidade relativa, o que causa níveis excessivos de degradação. A maneira mais eficiente de usar o forno acontece apenas quando o ar que é ventilado para o exterior sai completamente saturado, o que origina taxas desiguais de remoção de humidade na pilha e a temperatura e humidade do ar extraído variam consideravelmente, requerendo monitorização adicional para manter o ar fornecido a condições apropriadas. (Silva, 1992)

O planeamento de secagem é usado para controlar o procedimento no forno usando diferentes conjuntos de temperatura e humidade relativa durante a operação de secagem. Ananias et al (2008) refere que para a secagem de *Acacia melanoxylon* e *Acacia dealbata* utilizou o seguinte planeamento:

Tabela 3-1: Planeamento de secagem convencional

(adaptado de: Ananias et al, 2008)

Espessura [mm]	Conteúdo de humidade [%]	T [°C]
25	30-25	50
	25-10	75
	10	75
50	30-25	50
	25-10	65
	10	65

O autor conclui que a secagem foi satisfatória não havendo redução da qualidade da madeira.

Os esforços iniciais no dimensionamento de fornos de secagem não consideravam os diferentes requisitos de secagem, dimensões da madeira e conteúdo de humidade inicial. Não é de surpreender que estas tentativas não tiveram sucesso. O planeamento é um processo largamente baseado em métodos tentativa erro uma vez que a compreensão dos fenómenos de transferência de massa e calor dentro da madeira são bastante recentes (Silva, 1992). Tarmian et al (2009) refere que o incorrecto planeamento das experiências pode afectar as tensões de secagem na madeira, podendo ser responsáveis pela perda de qualidade.

3.3 SECAGEM EM FORNO A ALTA TEMPERATURA

A secagem a alta temperatura designa o processo pelo qual a madeira é seca a temperaturas acima de 100°C. As primeiras tentativas de reduzir os tempos de secagem através do uso de altas temperaturas datam do século XIX onde foram patenteados tecnologias por Alen e Campbell em 1867 (Kimball & Lowery, 1967). Mais tarde foi adquirida uma patente por Tiemann em 1918 pelo desenvolvimento de um forno de secagem de madeira com vapor sobreaquecido. Alguns fornos de secagem de vapor sobreaquecido foram instalados nos EUA. Contudo a deterioração, custo elevados de manutenção, falta de conhecimento do processo de secagem, secagem irregular, e viabilidade económica pobre forçaram o seu abandono (Silva, 1992).

De acordo com o Villière (1953), as principais dificuldades associadas à secagem a alta temperatura são: corrosão, controlo deficiente baseado no tempo total de secagem e humidade final extremamente variável. Durante a investigação deste método de secagem foi dada uma atenção especial à formulação e compreensão das relações entre o conteúdo em humidade na madeira e humidade relativa da atmosfera envolvente, como foi visto na sub-secção 2.3.

Os primeiros teste de secagem de madeira com temperaturas acima do ponto de ebulição da água foram realizados em 1941 por Fischer e Czepak (Kauman, 1956). Em 1949, Keylwerth desenvolveu as curvas do conteúdo de humidade em equilíbrio (EMC) para a secagem com vapor sobreaquecido. A importância da velocidade de circulação na taxa de secagem tem sido realçada em função dos diferentes papéis que desempenha na secagem a alta temperatura quando comparada com a sua importância na secagem convencional. As vantagens e desvantagens da secagem a alta temperatura foram formuladas em conjunto com as precauções requeridas para evitar defeitos inaceitáveis no produto acabado causado pelo processo de secagem (Kollmann, 1961).

Kimball & Lowery (1967) conduziram uma comparação entre secagem a alta temperatura e secagem convencional usando dois fornos do tamanho comercial. Apesar de ocorrerem mais frequentemente defeitos de secagem como colapso, endurecimento e fendas durante a secagem a alta temperatura, e daí a grande variação no conteúdo de humidade, os autores reportaram que a secagem a alta temperatura requer apenas um 1/4 do tempo requerido pela secagem convencional.

Já Taylor (1982) comparou os requisitos de energia durante a secagem de pinheiro a temperaturas de 79°C, 88°C e 100°C. Foi utilizado um forno experimental fechado e ventilado para medir o consumo de energia, o consumo específico de energia e a variação do tempo de secagem com a temperatura. O autor concluiu que, em média, o consumo específico de energia durante os testes a 116°C foi 12% inferior que nas restantes temperaturas.

Simpson (1985) realizou testes de secagem com *Pinus radiata* utilizando como temperatura operatória 70°C/60°C (temperatura bolbo seco/temperatura bolbo húmido) e 120°C/70°C. no

primeiro caso o tempo de secagem foi de 120 a 144 horas enquanto que no segundo caso demorou cerca de 24 horas. Assim, aumentando a temperatura de secagem, o tempo de secagem diminui, o que permite maior capacidade de secagem por ano e um retorno rápido do capital investido.

Comparando a secagem convencional com a alta temperatura, o autor verificou uma redução de 8% no consumo total de energia. Concluiu também, que ocorreu menos torção após secagem a alta temperatura e a resistência da madeira não foi afectada. A madeira seca a altas temperaturas reage menos facilmente a variações no conteúdo em humidade em equilíbrio. Isto é um importante factor a ter em conta quando se pretende seleccionar material para um uso final que esteja sujeito a variações pronunciadas no EMC. O encolhimento da madeira após a secagem a alta temperatura é maior devido ao facto de se atingir um menor conteúdo em humidade e o encolhimento ocorrer quando se atinge o ponto de saturação das fibras.

O conteúdo final de humidade após a secagem a alta temperatura é menor que os alcançados por outros métodos de secagem uma vez que o EMC a 120°C é 1.5% quando comparado 8.5% a 70°C na secagem convencional.

Fung (1976) procedeu à secagem de eucalipto alpino. As suas tentativas para secar rapidamente a altas temperaturas esta espécie desde a fase verde foram insatisfatórias. Contudo, quando se procedeu a uma pré-secagem ao ar até um EMC de 30 a 40%, as tábuas foram secas até 10% de EMC em 1.5 horas, 2 horas e 2.5 horas a temperaturas 180°C, 150°C e 130°C respectivamente e velocidades do ar de 10 m.s⁻¹.

A qualidade final em termos de torção e fendas foram favoráveis comparando com a secagem convencional que demorou 96 horas. A abertura de fendas foi reduzida através de diminuição da velocidade do ar (5 m.s⁻¹) ou igualar o gradiente de humidade após a secagem ao ar. Contudo verificou-se a ocorrência de descoloração, sendo esta mais pronunciada com o aumento da temperatura.

O autor procedeu também à secagem de eucalipto negro. As tábuas, com conteúdo inicial de humidade de 100 a 160%, foram secas até 10% a temperaturas de 130°C e 180°C, em 12 e 4 horas, respectivamente.

O autor refere que o efeito da velocidade do ar no tempo de secagem traduz-se do seguinte modo: uma diminuição da velocidade do ar de 10 m.s⁻¹ para 5 m.s⁻¹ aumenta o tempo de secagem em 30 minutos enquanto que um aumento da velocidade do ar de 10 m.s⁻¹ para 12 m.s⁻¹ reduz o tempo de secagem em 30 minutos.

Adesanya et al (1986) estudou experimentalmente o perfil da humidade durante a secagem a alta temperatura de madeira de choupo para determinar os diferentes mecanismos de secagem.

O autor verificou que a análise do perfil de humidade durante a secagem a alta temperatura de madeira de choupo mostra três regiões diferentes de secagem. A primeira região mostra uma taxa inicial constante onde a evaporação ocorre da superfície da madeira e o movimento da humidade ocorre por capilaridade. A segunda região onde se verifica uma taxa decrescente subdivide-se em dois períodos. O primeiro período verifica-se que o movimento da humidade é efectuado por capilaridade e por difusão líquida sendo que o segundo período o movimento da humidade ocorre por difusão do vapor.

Basilico et al (1988) realizaram testes para compreender o comportamento mecânico da madeira durante a secagem. Concluíram que para tábuas finas de espécies fáceis de secar, a secagem a alta temperatura dá resultados satisfatórios devido ao comportamento visco-elástico e à deformação simultânea na zona quente externa na expansão e na zona interna molhada na compressão, sendo estas zonas da mesma ordem de grandeza de espessura. Para tábuas espessas de espécies mais difíceis de secar, o comportamento é diferente devendo-se à zona interna onde existe água livre e devido à sua elevada solidez mecânica que não fica deformada.

Simpson & Tschernitz (1998) realizaram o estudo sobre o efeito da espessura da madeira na deformação da tábua aquando da secagem a alta temperatura. Utilizaram pinho com as condições operatórias de 116°C (temperatura de bolbo seco), 82°C (temperatura de bolbo húmido) e 5.1 m.s⁻¹ velocidade do ar, sendo que a direcção da ventilação era alterada de 3 em 3 horas. A humidade final que se pretendia atingir era de 15%.

Os autores verificaram que o tempo de secagem variou desde 17 a 21 horas. Após a secagem, a madeira foi arrefecida durante 16 horas. Os resultados obtidos não permitiram retirar conclusões estatísticas relevantes, no entanto pôde-se observar algumas tendências. Pareceu claro, que as tábuas muito finas têm a tendência de deformar mais do que as tábuas mais espessas. As tábuas que possuem parte do borne deformam mais assim como as tábuas perto do borne.

Boone (1984) testou cerca de 12 espécies de diferentes características. As condições operatórias utilizadas foram 88°C (temperatura de bolbo húmido) e 93°C (temperatura de bolbo seco) que foram alcançadas em 2 a 3 horas. Após este período a temperatura de bolbo seco foi aumentada para 110°C e foi mantida até atingir o conteúdo de humidade de 10% ou menos (20 a 26 horas). Para atingir o objectivo final de 6% de EMC a madeira foi acondicionada a 82°C (temperatura de bolbo húmido) durante 10 a 12 horas.

O autor verificou que os conteúdos em humidade, que na fase verde variavam entre 50 a 185%, baixaram rapidamente nas primeiras 24 horas atingindo os 10% em todas as espécies após a secagem a alta temperatura. Conseguiu-se atingir um valor objectivo de 6 a 8% em conteúdo de humidade em 50 a 55 horas. Verificaram também que a média dos valores do conteúdo em

humidade e os desvios padrão são mais baixos depois do acondicionamento da madeira. Este tratamento permitiu a libertação das tensões em todas as espécies. Mais de 50% dos defeitos observados foram classificados como ‘sem importância’. No entanto, o defeito mais comum é o ninho de abelhas.

3.4 SECAGEM PRESSURIZADA A ALTA TEMPERATURA COM VAPOR SOBREAQUECIDO

Uma das vantagens da secagem pressurizada com vapor é a possibilidade do processo manter elevados níveis de EMC a altas temperaturas uma vez que os fornos a alta temperatura raramente conseguem manter um EMC acima de 4% (Rosen et al, 1983). Um valor tão pequeno em conteúdo de humidade em equilíbrio na superfície da tábua leva a gradientes excessivos em conteúdos de humidade e secagem excessiva.

A necessidade de melhorar a secagem a alta temperatura conduziu à investigação das relações entre o conteúdo em humidade de equilíbrio na madeira e a secagem com vapor pressurizado a alta temperatura. O resultado desta investigação indicou que, para uma dada temperatura, o conteúdo de humidade em equilíbrio para a madeira aumentaria com o aumento da pressão. Como a superfície da madeira alcança o EMC antes da parte interior da tábua, quanto menor o EMC, mais rápida será a evolução dos gradientes de humidade na tábua. Por isso, na secagem pressurizada com vapor é possível associar as vantagens da secagem rápida a alta temperatura, com a menor degradação causada por gradientes pronunciados de conteúdo de humidade (Silva, 1992).

Este método de secagem é realizado numa câmara fechada com recirculação de vapor sobreaquecido, que fornece energia extra uma vez que o fluido quente de secagem não tem de ser substituído por ar fresco. O controlo do forno é simplificado em relação a outros métodos a alta temperatura usando misturas de ar quente e vapor sobreaquecido desde que o controlo da temperatura e a válvula de controlo de pressão permitam uma verificação completa da temperatura e humidade dentro do forno. (Silva 1992).

Tem sido efectuado pouco trabalho na área de secagem de madeira com vapor, acima da pressão atmosférica. No entanto, Rosen et al (1983) referiram que, nos testes efectuados com madeira de choupo, bétula, carvalho silvestre, freixo, nogueira negra seca ao ar livre e carvalho vermelho, os defeitos mais comuns encontrados foram escurecimento, fendas próximas a nós e aberturas nas tábuas. Nas madeiras macias a madeira de choupo apresentou uma melhor resposta neste método de secagem a nível de defeitos. Já nas madeiras duras detectou-se alguns defeitos visíveis.

Nos seus testes, a madeira foi seca a temperaturas na gama de 116°C a 138°C e pressões de 1.1 bar até 2 bar. A velocidade de vapor foi fixada em 1.27 m.s⁻¹. Como a superfície da madeira atinge EMC muito antes que o interior, desenvolvem-se gradientes de humidade pronunciados na secagem

da madeira e, conseqüentemente, resultam em defeitos de secagem e tensões internas no interior da tábua. Este problema pode ser reduzido mantendo níveis elevados de EMC a altas temperaturas. Assim, em alguns testes, as tábuas foram condicionadas durante 4 a 6 horas, à temperatura de 101°C e pressão de 1 bar, para alívio de tensões provocadas pela secagem.

Madeira de choupo foi seca desde a fase verde até conteúdo final em humidade de 5.1% a 8%. Madeira de bétula foi seca desde a fase verde até 4% a 7% de conteúdo de humidade final. Para carvalho vermelho e nogueira negra foi efectuada uma pré-secagem ao ar livre antes de secagem pressurizada. Os tempos de secagem variaram entre 20 a 43 horas, diminuindo com o aumento da temperatura.

Quanto ao consumo específico de energia, este variou desde 8.16 MJ.kg⁻¹ de água evaporada a 43.44 MJ.kg⁻¹. Estes valores mostram uma redução de 50 % quando comparados com a secagem convencional em fornos de igual capacidade.

Pang & Pearson (2002) compararam a secagem de madeira *Pinus radiata* em vácuo e pressurizada com a secagem utilizando ar quente húmido.

Como condições operatórias para os testes em vácuo, foi utilizada a temperatura de 90°C e a pressão absoluta foi mantida a 0.2 bar (o que corresponde a um ponto de ebulição de 60°C). Nestas condições, a densidade do vapor torna se muito baixa e a sua capacidade calorífica é reduzida, utilizando-se, por isso uma velocidade de circulação elevada, neste caso 10 m.s⁻¹. As condições operatórias para secagem pressurizada são: temperatura de 160°C e pressão 3 bar (o que corresponde a um ponto de ebulição de 133.5°C). A velocidade de circulação foi também mantida a 10 m.s⁻¹.

Os autores observaram que a queda de temperatura ao longo do empilhamento das tábuas na secagem pressurizada foi muito menor que na secagem com vácuo uma vez que o vapor pressurizado tem uma elevada capacidade calorífica com uma elevada densidade (1.6 kg.m⁻³ a 3 bar). É por isso espectável que a secagem pressurizada com vapor sobreaquecido seja mais rápida e uniforme.

Os resultados experimentais mostraram que, para secar a madeira até 10% de EMC a secagem em vácuo demora 48 horas enquanto que a secagem com ar quente húmido (90°C) demorou 31 horas. Contudo, os autores referem que a taxa de secagem com vapor sobreaquecido pode ser aumentada com aumento de velocidade de circulação.

Como esperado, a taxa de secagem na secagem pressurizada com vapor sobreaquecido foi mais elevada que a secagem a vácuo devido à maior temperatura e capacidade calorífica mais elevada. Obteve-se um tempo total de secagem de 9.2 horas incluindo o tempo de pré-aquecimento (1.5 horas) até se obter um EMC de 10%. Examinando os conteúdos de humidade em equilíbrio das

tábuas foi revelado que a distribuição de humidade neste método de secagem era uniforme através do empilhamento (exceptuando a ultima camada).

A madeira situada nos limites da pilha seca mais rapidamente do que a média em geral na secagem a vácuo. Isto verifica-se devido a taxa constante de secagem. Na secagem com vapor sobreaquecido, a resistência interna ao movimento da humidade é menor do que na secagem com ar quente húmido particularmente para temperaturas abaixo de 100°C. Por isso, a superfície da tábua irá manter um conteúdo relativamente elevado por um longo período de tempo, durante o qual a tábua seca a taxa constante. Mesmo assim, a baixa temperatura da madeira é vantajosa na redução de ocorrência de defeitos de secagem.

A temperatura dentro da madeira foi um pouco acima da temperatura de saturação de vapor de 133.5 °C sob a pressão 3 bar. Isto é particularmente interessante uma vez que a rigidez da madeira diminui com o aumento da temperatura, tornando-se, deste modo, mais elástica com o conteúdo de humidade acima de 5%. Assim, as forças dentro da madeira são relaxadas e as tensões de secagem podem ser efectivamente aliviadas.

Silva (1992) desenvolveu um trabalho cujo objectivo era aprofundar um planeamento adequado da secagem de madeira, tendo em atenção os factores necessários a secagem como por exemplo o nível adequado de controlo automático, a minimização do consumo de energia e a qualidade final do produto seco, e o desenvolvimento de um modelo numérico que simula o processo de secagem a temperaturas acima de 100°C e pressões superiores a pressão atmosférica.

As condições operatórias utilizadas foram: temperaturas na gama de 100°C a 150°C e pressões entre 1 atm e 2.5 atm.

Na análise de resultados o autor concluiu que a secagem de madeira a alta temperatura e a alta pressão é um método valido de secagem rápida, tendo um uso eficiente de energia e assegura uma boa qualidade do produto final

Foi observado que o EMC variou entre 1.3% para 150°C e 1 atm e 8% para 130°C e 2 atm.

Na análise aos tempos de secagem, verificou que estes aumentaram como o aumento da pressão e diminuição da temperatura. Apesar disso os tempos de secagem são muito menores do que os requeridos para a secagem convencional.

A nível da qualidade do produto final, foi verificado a existência de separação de nós da tábua e escurecimento da superfície e alguma parte interna, sendo que a coloração da superfície parece estar associada a condições com pressões elevadas.

Quanto à eficiência energética do processo, observou que, de um modo geral temperaturas elevadas e secagem pressurizada implicam maior consumo de energia. A energia utilizada na recirculação

do fluido de secagem tem um papel mais importante à medida que a pressão aumenta. Para os testes em que se utilizou baixas pressões, a energia necessária para atingir a temperatura de operação representa o maior componente. A análise dos dados mostrou que quanto maior for a temperatura menor o consumo específico de energia enquanto que o oposto se aplica à pressão.

3.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PROCESSO DE SECAGEM PRESSURIZADA DE MADEIRA COM VAPOR SOBREAQUECIDO

O processo de secagem pressurizada de madeira com vapor sobreaquecido é um processo que apresenta vantagens, algumas das quais inovadoras face aos outros processos de secagem. O facto de apresentarem custos equivalentes aos outros tipos de secagem, é um processo mais rápido e mais eficiente energeticamente, uma vez que se processa numa câmara fechada, não havendo necessidade de aquecer ar frio, como se verifica nos fornos convencionais. Os fornos a vapor conseguem manter elevados níveis de humidade em equilíbrio a elevadas temperaturas enquanto que os fornos de elevada temperatura raramente mantêm as condições de humidade de equilíbrio acima de 4%. Verifica-se que os fornos a vapor ocupam menos espaço que os convencionais assim como os custos de manutenção e laboração são menores (Rosen et al, 1983).

No entanto, é um facto que muito ainda precisa de ser feito para colmatar algumas desvantagens que este processo apresenta tais como a degradação excessiva da madeira pela secagem e a rápida corrosão do equipamento. Os custos energéticos também são um problema a ultrapassar. Embora o custo do vapor seja menor para secagem pressurizada, o custo do consumo dos ventiladores é elevado, assim os custos energéticos totais são maiores para a secagem pressurizada com vapor (Rosen et al, 1983).

4 INSTALAÇÃO DE SECAGEM

A estação de secagem existente no laboratório do TEMA é uma parte fundamental deste trabalho. É constituída por vários sistemas, cada um relevante para o controlo das condições operatórias respectivas. Por isso, achou-se conveniente especificar aqui algumas das suas características mais importantes que permitiram o controlo das variáveis operatórias e aquisição dos dados para futura discussão e interpretação.

4.1 ESTAÇÃO DE SECAGEM

O sistema de secagem existente no laboratório do TEMA é apresentado na Figura 4-1.

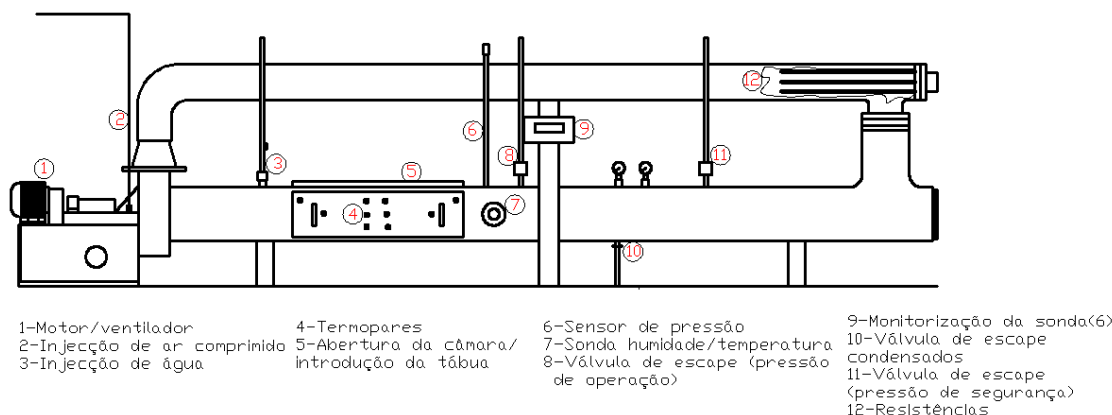


Figura 4-1: Estação de secagem

A estação de secagem com capacidade para uma tábua por processo incorpora os vários sistemas que são responsáveis pelo controlo das condições operatórias: sistema de aquecimento, sistema de ventilação, sistema de pressurização, sistema de injeção de água, sistema de injeção de ar comprimido, sistema de pesagem da tábua em contínuo e sistema de controlo e aquisição de dados. No Anexo D pode encontrar-se imagens da estação de secagem assim como de alguns equipamentos utilizados ao longo das experiências. Nas próximas páginas serão descritos com algum pormenor, os sistemas importantes para obtenção e controlo das condições operatórias.

4.1.1 SISTEMA DE CONTROLO E AQUISIÇÃO DE DADOS

O controlo e aquisição dos dados das variáveis do sistema são feitos com recurso a um *software* já desenvolvido anteriormente – SPAT CMS V1.0 (Norte, 2010). A Figura 4-2 apresenta o ambiente inicial do *software*.

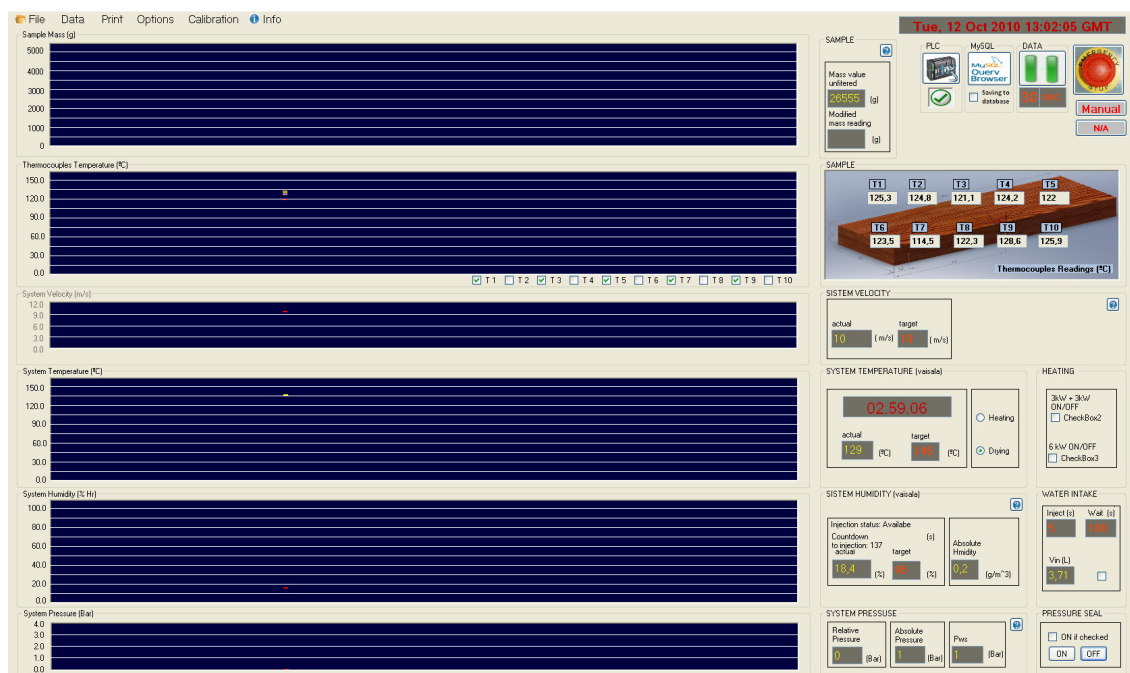


Figura 4-2: Ambiente inicial do software

A partir deste *software* é possível controlar instantaneamente as variáveis operatórias e leituras do sistema. A Figura 4-3 apresenta a janela de definição das variáveis operatórias da experiência e da definição do tempo de aquisição dos dados pelo *software*.

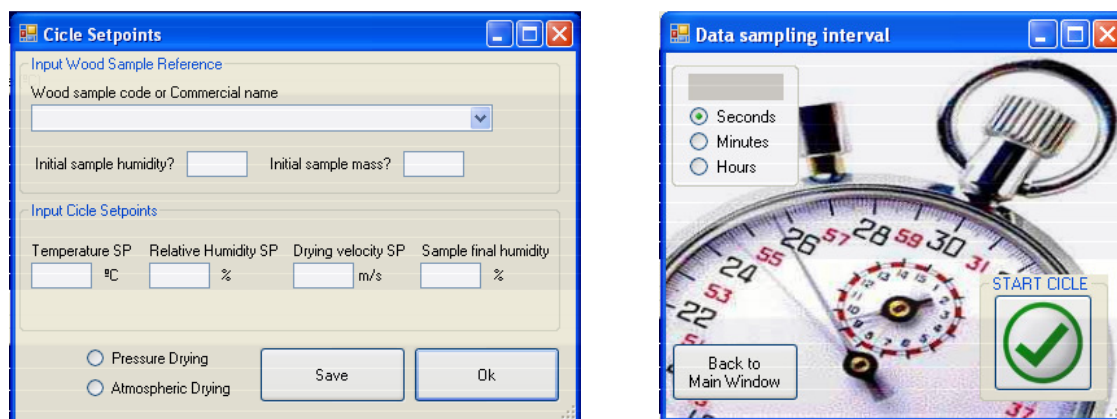


Figura 4-3: Janela de definição das variáveis operatórias e tempo de aquisição de dados

Na Figura 4-4 são apresentados os comandos manuais que permitem variar as condições operatórias.

O controlo manual foi utilizado nas experiências em que a velocidade de operação era diferente de 10 m.s^{-1} , uma vez que o *software* tem como requisito arrancar em 10 m.s^{-1} pelo menos até ao fim da fase de aquecimento, prosseguindo depois com a velocidade de operação.

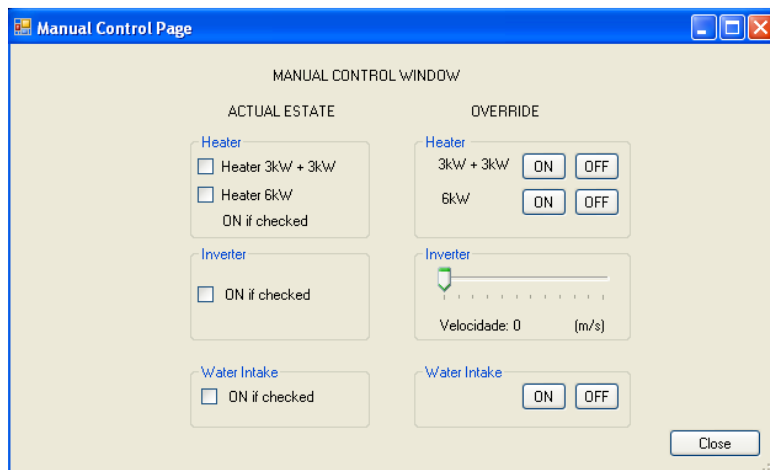


Figura 4-4: Janela de comandos manuais

4.1.2 SISTEMA DE AQUECIMENTO

O sistema de aquecimento é composto por três resistências: duas em inox com diâmetro de 8 mm dobradas em U, com distância entre terminais de 50 mm, U de comprimento 1000 mm, com tensão de 400 V e potência de 3 kW, e uma resistência em inox com alhetas e comprimento igual às anteriores, com tensão de 400 V e potência de 6 kW.


O seu funcionamento não é contínuo dependendo da temperatura registada dentro da câmara, isto é:

- Até atingir a temperatura objectivo as três resistências estão ligadas;
- Quando atinge a temperatura pretendida as resistências de 3 kW desligam permanecendo apenas a resistência de 6 kW ligada;
- Quando a temperatura do sistema ultrapassa em 1°C a temperatura pretendida as resistências de 3 e 6 kW desligam-se;
- Quando se atinge novamente a temperatura pretendida a resistência de 6 kW liga;
- Quando se atinge 1 °C abaixo da temperatura pretendida as resistências de 3 kW e de 6 kW ligam-se.

4.1.3 SISTEMA DE VENTILAÇÃO

O sistema de ventilação é composto por um motor/ventilador, que força a circulação do ar pelo sistema. As características do motor são as apresentadas na Tabela 4-1. Neste sistema teve que se proceder à mudança do engate do tubo de ar comprimido, sendo esta alteração referida no Anexo E, que descreve as peças substituídas na instalação.


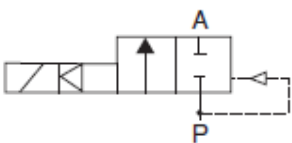
Tabela 4-1: Características do motor/ventilador

	Motor EFACEC IEC 34-1
	Frequência: 50 Hz
	Rotação: 2890 min ⁻¹
	Potência: 7,5 kW
	cos φ: 0,90
	Tensão: 380-415V
Intensidade: 14,6 A	

4.1.1 SISTEMA DE INJEÇÃO DE ÁGUA

O sistema de injeção de água é composto por uma electroválvula que permite a injeção de água na estação de secagem. As características da electroválvula *Burkert* encontram-se na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Características da electroválvula de injeção de água

		Electrovalvula Burkert 6213 A 20.0 NBR MS
		G3/4
		Gama de pressão: 0-10 bar
		Gama de temperatura: -10°C a 80°C
		Tensão: 24V
		http://www.burkert.com/products_data/datasheets/DS6213-HP-EU-EN.pdf

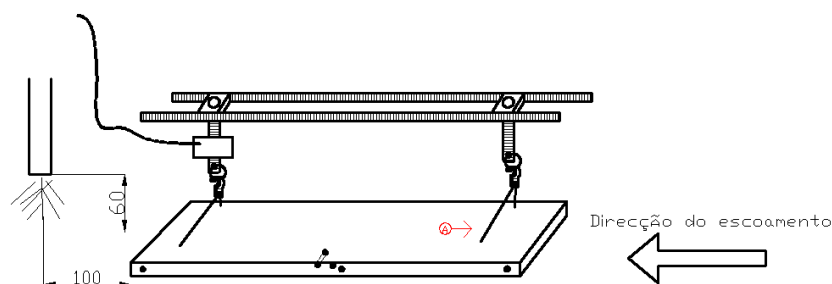


Figura 4-5: zona de suspensão da tábua (distâncias em mm)

Como se pode observar na Figura 4-5, a injeção de água é feita bastante próxima à extremidade esquerda da tábua, sendo o tempo de injeção e intervalo entre injeções definido pelo operador através do *software* (Figura 4-6). Estes parâmetros são muito importantes uma vez que irão permitir, na teoria, a pressurização do sistema.

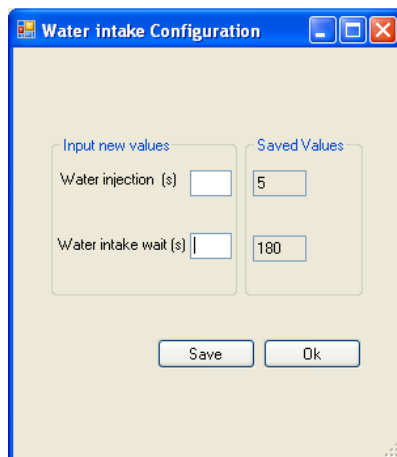


Figura 4-6: Janela do *software* que permite ao operador controlar o tempo e intervalo de injeção

4.1.2 SISTEMA DE INJEÇÃO DE AR COMPRIMIDO

O sistema de injeção de ar comprimido tem a função de impedir fugas de pressão pelo veio do ventilador. Contudo é impossível impedir a entrada de ar comprimido para a câmara de secagem, o que provoca a pressurização do sistema. Assim, em vez do sistema ficar pressurizado com vapor de água, irá ficar pressurizado também com uma percentagem em ar seco, o que vai provocar alterações nas leituras de humidade relativa do sistema e *steam content*. O sistema de injeção de ar comprimido é constituído por um filtro/regulador e um lubrificador, cujas características estão apresentadas na Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Características do filtro/regulador e lubrificador

	<p>Filtro/Regulador WILKERSON Modelo B18-02-FKG0</p> <p>Máxima pressão: 10,3 bar</p> <p>Gama de temperatura: até 52,0°C</p>
<p>http://www.wilkinsoncorp.com/9EM-TK-190/9EM-TK-190-2_Complete.pdf pág. 238</p>	
	<p>Lubrificador WILKERSON Modelo L18-C4-LK00</p> <p>Máxima pressão: 10,3 bar</p> <p>Gama de temperatura: até 52,0°C</p>
<p>http://www.wilkinsoncorp.com/9EM-TK-190/9EM-TK-190-2_Complete.pdf pág. 198</p>	

4.1.3 SISTEMA DE PRESSURIZAÇÃO

Como já foi referido, a pressurização do sistema realiza-se com a injeção de água e a sua evaporação e, intencionalmente, com a injeção de ar comprimido. Contudo, após atingir a pressão desejada, é necessário controlá-la para se manter constante ao longo da experiência. Para isso, são utilizadas válvulas de regulação manual, como apresenta a Tabela 4-4.

Tabela 4-4: Válvula de controlo de pressão



Na estação de secagem existem duas válvulas, uma delas com função de segurança encontrando-se actualmente regulada para uma pressão de 1,2 bar. A outra válvula é regulada consoante a condição operatória requerida. Neste trabalho experimental esta válvula esteve regulada para 0,5 e 1,0 bar, conforme o caso. Contudo quando o interior da câmara se encontrar a uma destas pressões, dependendo da experiência, a válvula libertará o conteúdo da câmara, não se sabendo quais as percentagens de ar e vapor que serão libertadas, conforme a Figura 4-7.

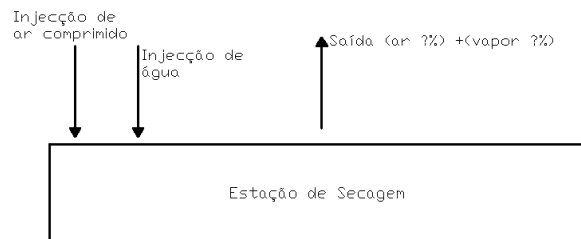


Figura 4-7: Regulação da pressão no interior do sistema

Contudo é de salientar que após cada experiência pressurizada é necessário desencaixar o tubo da válvula para remoção de condensados de modo a evitar a obstrução da saída do conteúdo da câmara. Isto aplica-se tanto nesta válvula como na válvula de segurança.

4.1.4 SISTEMA DE PESAGEM DA TÁBUA EM CONTÍNUO

O peso da tábuia é medido pela célula de carga, colocada na extremidade esquerda da tábuia. Como não se encontra sensível aos dois pontos suspensos da tábuia é necessário garantir que a tábuia esteja perfeitamente alinhada na horizontal e perfeitamente estabilizada, de modo a que não haja movimentos bruscos durante o processo de secagem para que influencie os dados adquiridos. Para

isso é que foram construídos os apoios/encaixe da tábua para que a célula de carga não sofra reacções provocadas pela movimentação do ar.



Figura 4-8: Célula de carga/apoio



Figura 4-9: Apoio para a tábua



Figura 4-10: Encaixe da tábua no sistema de apoio

Ao longo do processo, a célula de carga adquire os valores da massa da tábua no intervalo de tempo definido pelo operador, sendo registados pelo *software*. As características da célula de carga estão apresentadas na Tabela 4-5.

Tabela 4-5: Características da célula de carga

	Modelo 31
	Capacidade: 4,54 kg
	Sinal de saída: 2mv/v
	http://content.honeywell.com/sensing/sensotec/pdf_catalog08/008630-1-EN_Model_31_Mid.pdf

4.1.5 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VALORES DE VARIÁVEIS

A medição dos valores das variáveis ao longo das experiências é feita com auxílio a sondas e termopares. Para a medição da temperatura e humidade relativa do sistema é utilizada a sonda apresentada na Tabela 4-6.

Tabela 4-6: Características do sensor de humidade e temperatura

	Sensor de humidade/temperatura Vaisala HMP 238
	Gama de humidade relativa operacional: 0 até 100 %
	Gama de temperatura operacional: -40°C até 180°C.
	http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/HMP230_UserGuide.pdf

Já para a medição da temperatura nos diferentes locais da tábua são utilizados termopares (Tabela 4-7).

Tabela 4-7: Características dos termopares



Termopar tipo J modelo TC1M B

Gama de temperatura operacional: -40°C até 550°C.

http://www.gefran.com/en/products/product_546.aspx

A medição da pressão é feita com recurso a um sensor apresentado na Tabela 4-8.

Tabela 4-8: Características do sensor de pressão



Modelo PX35K1-500GV

Gama de pressão operacional: 0 até 34,5 bar

Gama de temperatura operacional: -73°C até 163°C

<http://www.omega.com/pptst/PX35K1.html>

5 PLANIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

A planificação das experiências, é uma etapa fulcral para um desenvolvimento deste trabalho experimental, e como tal, foi deve ser criteriosamente estabelecida. Os protocolos devem ser objectivos e claros permitindo assim obtenção de melhores resultados e menor frequência de erros. Assim, neste capítulo vão ser estabelecidos os protocolos experimentais assim como todas as especificidades da actividade experimental.

5.1 MADEIRA

Neste trabalho são utilizadas tábuas de madeira de pinho verde com as seguintes dimensões: 1000 mm de comprimento, 150 mm de largura e espessura 25 mm como se pode observar na Figura 5-1.

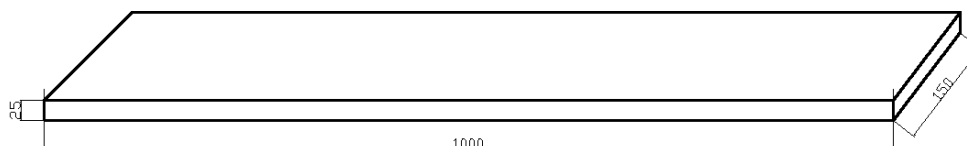


Figura 5-1: Representação esquemática das tábuas de pinho verde (unidades em mm)

As tábuas foram cortadas de um pinheiro com 13 metros de altura (Figura 5-2), proveniente da região centro. O abate do Pinheiro realizou-se num dia em que ocorreu precipitação (05/03/2010). O pinheiro foi cortado em rolos de 2.5 metros (Figura 5-3). Para a obtenção das tábuas com as dimensões pretendidas só foram utilizados dois rolos inferiores do qual se obteve tábuas de 2.5 metros (Figura 5-4). De cada tábua de 2.5 m foram obtidas 2 tábuas de 1 m, num total 16 tábuas, e 0.5 m desperdiçados. As tábuas com 1 m de comprimento foram embrulhadas em sacos pretos (Figura 5-5), para garantir o seu isolamento.



Figura 5-2: Tronco de *Pinus pinaster*



Figura 5-3: 4 rolos de 2.5 m de comprimento



Figura 5-4: Tábuas 2.5 m de comprimento

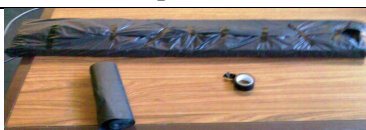


Figura 5-5: Tábua embrulhada em saco preto, e respectivos sacos e fita isoladora

5.2 PROTOCOLO EXPERIMENTAL

Todas as experiências se processam da mesma maneira, variando apenas as condições operatórias, ou seja, temperatura, velocidade de escoamento, pressão e injeção de água.

A experiência divide-se em 4 fases principais, cada uma com várias etapas, como mostra o seguinte esquema:

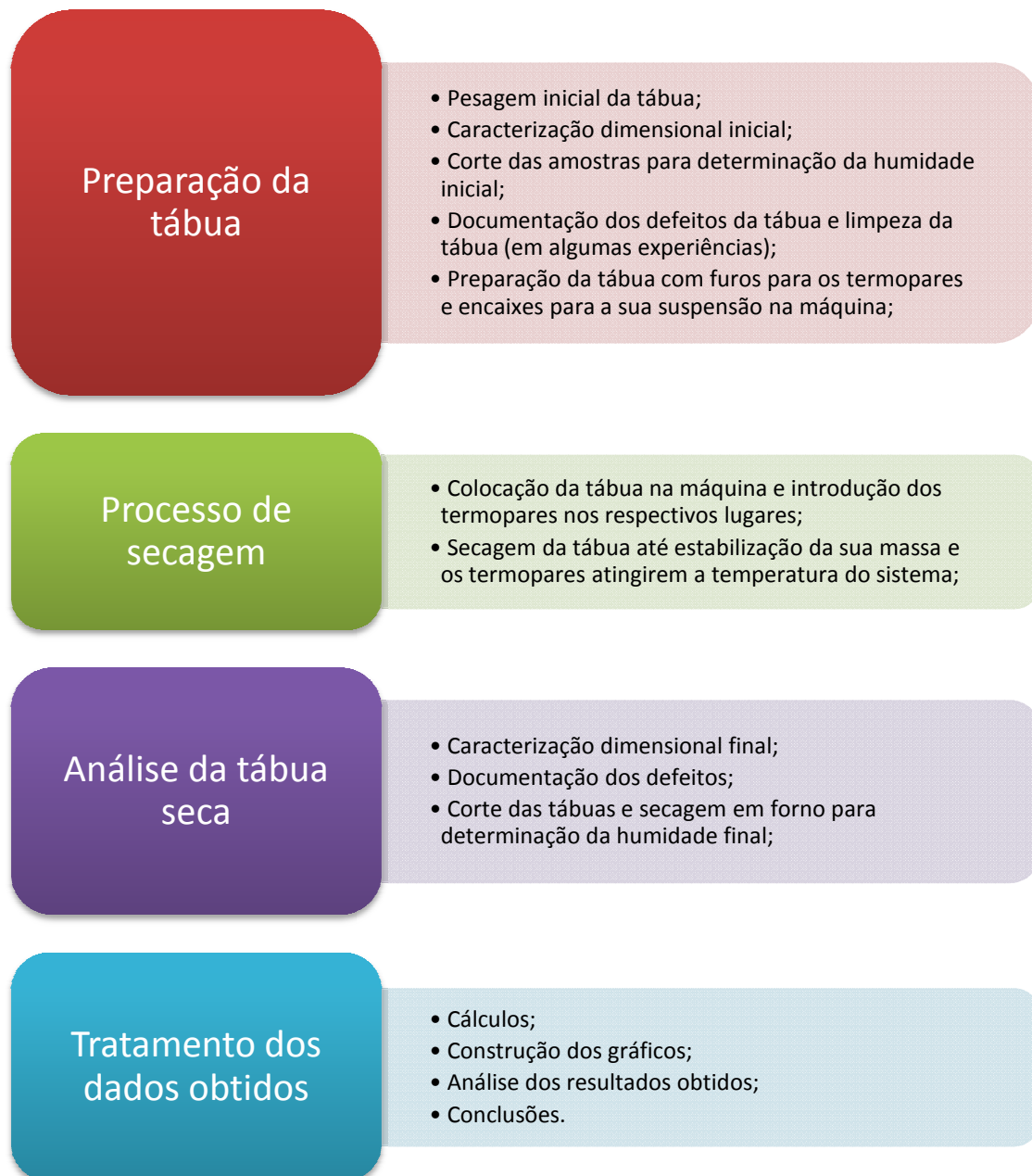


Figura 5-6: Esquema resumido dos passos do protocolo experimental

5.2.1 PREPARAÇÃO DA TÁBUA

Na fase de preparação da tábua procede-se em primeiro à pesagem inicial da tábua e respectiva caracterização dimensional nas componentes do comprimento, largura e espessura. A caracterização dimensional da tábua é um parâmetro relevante neste tipo de ensaio prático, por várias razões: incertezas associadas ao corte da tábua, o que pode influenciar o processo de remoção de água e também porque o processo sujeita as tábuas a condições operatórias que pode levar a diferenças nas dimensões da tábua, antes e depois da secagem. A tábua foi verificada no comprimento, largura e espessura de acordo com a figura seguinte:

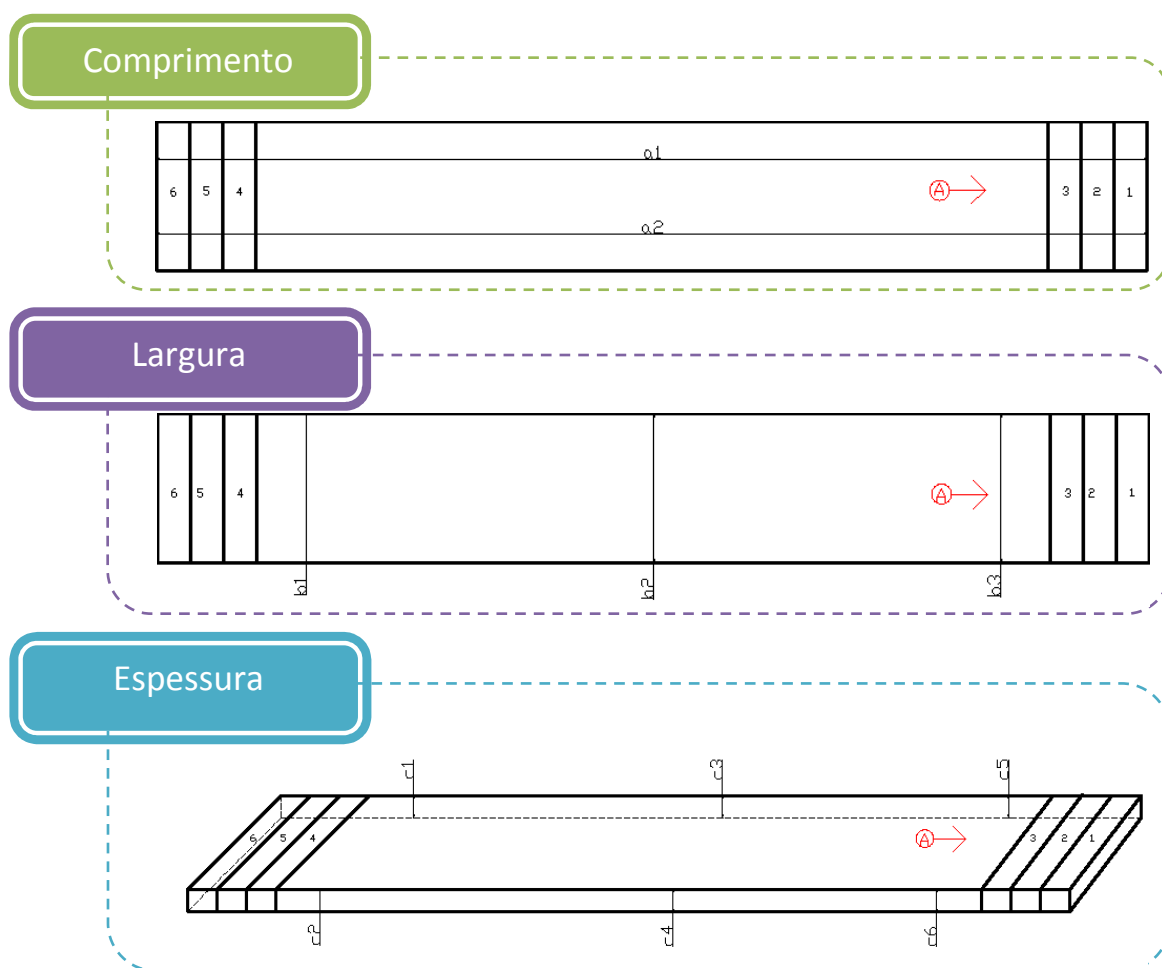


Figura 5-7: Caracterização dimensional da tábua

Os valores obtidos foram posteriormente comparados com os valores obtidos após a secagem.

A etapa seguinte é o corte das 6 amostras (3 de cada extremidade) com dimensões 150 mm de comprimento, 33.33 mm de largura e espessura de 25 mm como se pode observar na Figura 5-8.

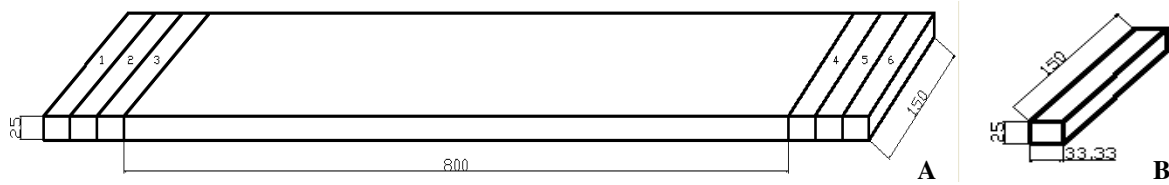


Figura 5-8: A: Representação esquemática dos cortes das amostras da tábua inicial; B: Amostra

Estas amostras foram pesadas obtendo assim a sua massa inicial ($m_{a.inicial}$). Posteriormente foram secas numa estufa de secagem à temperatura de 105°C durante pelo menos 72 horas (sendo monitorizado o seu valor a cada 24 horas, se possível). Após secagem foram pesadas novamente anotando-se seu valor – massa da amostra seca ($m_{a.seca}$). O conteúdo em humidade inicial da amostra pode ser agora calculado em base seca pela seguinte expressão.

$$W_{i.bs} = \frac{m_{a.inicial} - m_{a.seca}}{m_{a.seca}} \times 100 \quad \text{Eq. 5-1}$$

O conteúdo de humidade inicial da tábua ($H_{t.inicial}$) é calculado com base na média do conteúdo de humidade das amostras.

Após o corte das amostras, a tábua restante irá ser observada, verificando a sua dimensão de comprimento (a_1 e a_2) e documentadas as particularidades e defeitos que possa já ter, como por exemplo, existência de nós, fendas, direcção dos veios da tábua, manchas, etc., para depois possibilitar uma comparação e verificar se o processo de secagem originou alguns defeitos na tábua. Como se observou que o armazenamento provocava a formação de bolores e manchas na tábua, a partir da experiência 4 optou-se por fazer uma limpeza à tábua antes de levá-la a secar.

Os termopares foram utilizados na medição da temperatura em vários pontos da tábua. O uso de termopares inseridos no centro da tábua permite determinar o ponto final de secagem. (Panow & Nester 1984, 1985). Basicamente, existem duas possibilidades de inserção dos termopares no interior da madeira: longitudinalmente e tangencialmente (Figura 5-9). O método mais conveniente para a indústria parece ser o último, chamado “ método de penetração”, embora possa existir imprecisões devido a transferência de calor ao longo do termopar (Panow & Nester, 1985).

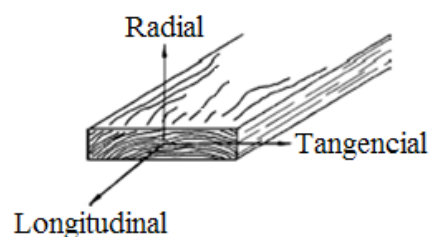


Figura 5-9: Planos da tábua
(adaptado de: Martins & Araújo, 2005)

Nas experiências, os termopares são colocados nos seguintes pontos:

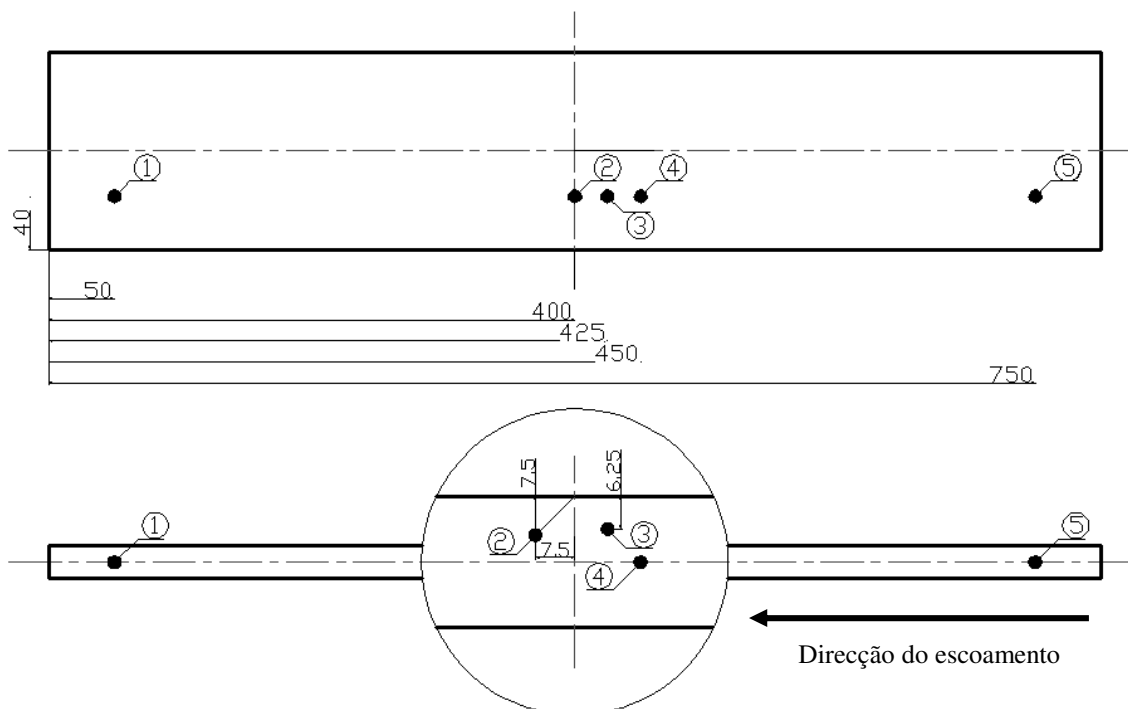


Figura 5-10: Localização dos termopares na tábua

O termopar 1 é o que está mais afastado do início do escoamento (L1) e o termopar 5 o que está mais próximo do início do escoamento (L5). Os termopares 1, 4 e 5 são termopares colocados no início, meio (L4) e fim da tábua (em termos de comprimento), respectivamente, sendo colocados no centro da tábua em termos de espessura (12,5 mm de profundidade). O termopar 3 foi colocado na parte superior da tábua, a 6,25 mm de profundidade (L3), e a extremidade do termopar 2 foi colocado à superfície da tábua (L2). Todos os termopares estão colocados a 40 mm de perfuração (em termos de largura) e o diâmetro dos orifícios é de 2mm.

5.2.2 PROCESSO DE SECAGEM

Na 2ª fase da realização da experiência a tábua é introduzida no interior da máquina, suspensa pelas extremidades, com os respectivos termopares colocados nos seus lugares, estando o processo pronto a ser iniciado, com as condições operatórias seleccionadas.

A secagem da madeira deve terminar apenas quando se verificar a estabilização da massa da tábua e quando os termopares atingirem a temperatura do sistema. Quando esta condição se verificar, pode-se então terminar o processo de secagem e passar à 3ª fase.

5.2.3 ANÁLISE DA TÁBUA APÓS SECAGEM

Esta fase compreende várias etapas. Começa-se por fazer a caracterização dimensional da tábua após a secagem. Esta etapa permite saber em primeira análise se ocorreu defeitos ou alteração das dimensões da tábua provocadas pelas condições operatórias no processo. Após esta etapa segue-se a documentação dos defeitos da tábua para comparação com os defeitos e particularidades iniciais da tábua antes da secagem. Em seguida a tábua é cortada em 10 fracções e colocada no forno a 105°C durante pelo menos 72 horas, para poder possibilitar o cálculo da humidade final da tábua.

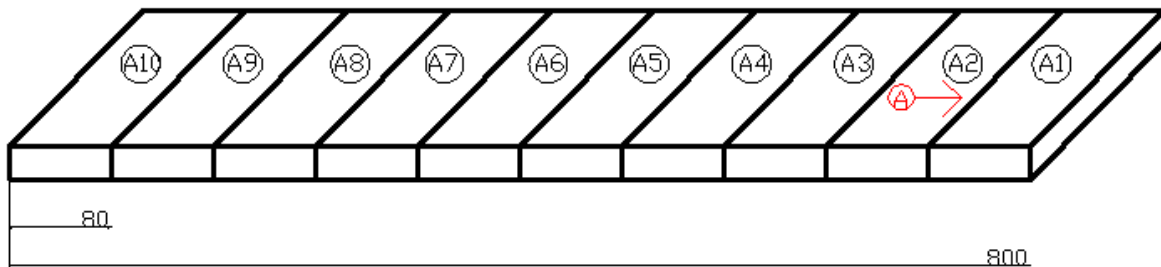


Figura 5-11: Representação de corte e numeração das 10 amostras finais

O cálculo da humidade final da tábua ($H_{t.final}$) efectua-se de modo idêntico ao cálculo da humidade inicial da tábua, através da Eq. 5-2, seguido da respectiva média das humidades das fracções.

$$W_{f.bs} = \frac{m_{fr.inicial} - m_{fr.final}}{m_{fr.final}} \quad \text{Eq. 5-2}$$

5.2.4 TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS

Após esta etapa segue-se por fim a análise dos resultados obtidos com os cálculos das humidades inicial e final, tratamento dos dados adquiridos pelo sistema e construção de gráficos comparativos.

Os dados obtidos do processo de secagem para tratamento são:

- Temperatura do sistema [°C];
- Humidade relativa do sistema [%];
- Temperatura adquirida pelos termopares [°C]
- Pressão do sistema [bar];
- Velocidade de ventilação [m.s^{-1}];
- Massa da tábua [g];

- Volume de água injectado [dm³];
- Tempo da experiência [s];
- Consumo energético das resistências e ventilador [kWh].

Estes dados irão ser tratados para que se possa calcular alguns indicadores de modo a poder tirar conclusões.

Quantidade de água removida da tábua

$$m_{\text{água removida}} = m_{t.\text{final}} - m_{t.\text{inicial}} \quad \text{Eq. 5-3}$$

Teor de humidade médio da tábua em cada instante do processo de secagem

$$\bar{H}_{t,i} = \frac{H_{t.\text{final}} - H_{t.\text{inicial}}}{m_{t.\text{final}} - m_{t.\text{inicial}}} (m_{t,i} - m_{t.\text{inicial}}) + H_{t.\text{inicial}} \quad \text{Eq. 5-4}$$

Teor de humidade médio adimensional da tábua em cada instante do processo

$$\bar{H}_{t,i,\text{adm}}[-] = \frac{\bar{H}_{t,i} - \bar{H}_{t.\text{final}}}{\bar{H}_{t.\text{inicial}} - \bar{H}_{t.\text{final}}} \quad \text{Eq. 5-5}$$

Steam content

$$SC = \frac{P_{wv}}{P_t} \quad \text{Eq. 5-6}$$

com, $P_{wv} = HR \times P_{\text{sat}}$ e valores a cada 0,25 horas Eq. 5-7

Taxa de secagem

$$t_{x_{\text{sec}}} = \frac{\bar{m}_{t.\text{inicial}} - \bar{m}_{t.\text{final}}}{\Delta t} \quad \text{Eq. 5-8}$$

com, médias de massas em intervalos de 0,25 horas e $\Delta t=0,25$ h

O teor médio de humidade da tábua a cada instante ao longo da experiência é um cálculo baseado na humidade inicial e final calculadas. Para se poder comparar todas as experiências, o teor médio de humidade foi adimensionalizado.

Devido à grande quantidade de valores adquiridos pelo sistema, para se conseguir visualizar a tendência da taxa de secagem ao longo do processo, foi optado por calcular médias de massas da tábua a cada 0,25 horas (15 minutos) e calculada a taxa de secagem com estes valores.

Com estes valores foram construídos gráficos apresentados ao longo da análise dos resultados.

5.3 CONDIÇÕES OPERATÓRIAS

As condições operatórias relevantes para este trabalho são a pressão, temperatura e velocidade do fluido. Na tabela seguinte (Tabela 5-1) pode se visualizar os valores utilizados.

Tabela 5-1: Gama de valores utilizados na actividade experimental

	Temperatura [°C]	Pressão [atm]	Velocidade do fluido [m.s ⁻¹]
Gama de valores utilizados	125	1	2
	135	1.5	6
	145	2	10

Os artigos que relatam estudos desenvolvidos em secagem de madeira e sobre os quais foi apoiada a selecção das gamas de valores utilizados para as condições operatórias encontram-se organizados no Anexo A – Dados de condições operatórias aplicadas à secagem de madeira

Em primeiro lugar foi realizado uma experiência na estação de secagem para simular secagem em um forno convencional à temperatura de 80°C, pressão 1 atm e velocidade do fluido 3 m.s⁻¹. Posteriormente foram realizadas as experiências com a combinação dos valores das condições operatórias gerados pelo Método de Taguchi, ao qual será dedicado o ponto seguinte.

5.3.1 MÉTODO DE TAGUCHI

Na indústria, o objectivo é melhorar o desempenho de qualidade de um produto ou processo, permitindo a satisfação do cliente, a menores custos. Por outras palavras, de uma perspectiva de qualidade, a experimentação procura encontrar, qual é o melhor material, a melhor pressão, a melhor temperatura, a melhor formulação química, tempo de ciclo, etc. a que o processo irá operar de modo a obter o resultado desejável, tendo em conta o custo (Center for Taguchi methods, 1987).

O engenheiro e especialista em estatística Genichi Taguchi, reviu o conceito de qualidade e desenvolveu uma nova metodologia usando a estatística na melhoria da qualidade de um produto ou processo. Segundo Taguchi, a qualidade de um produto depende das suas características, da sua adaptação à necessidade do cliente, dos custos associados não só à produção mas também a possíveis reparações, do seu tempo de vida e possíveis defeitos. Todos estes custos representam perdas na qualidade do produto e, consequentemente, perdas para o consumidor (Castela, 2009). Taguchi defende que um produto é tanto melhor quanto menor for a perda que esse produto represente para a sociedade (Ross, 1996).

As perdas de qualidade de um produto são, muitas vezes, verificadas após venda. Todas as alterações ao produto, realizadas depois do produto acabado, incrementam o custo. Para uma melhor eficácia, a qualidade do produto deve ser obtida na fase de planeamento, escolhendo-se os melhores processos e materiais. Nesta fase têm de ser tomadas decisões no que diz respeito aos parâmetros que afectam o produto ou o processo (Castela, 2009).

As características de um produto são influenciadas por factores. Estes variam entre níveis, cuidadosamente seleccionados de modo a que o seu controlo conduza a uma melhoria da qualidade do produto. Os factores podem ser de controlo e de ruído. Os factores de controlo são aqueles cuja escolha depende do produtor/técnicos. Os factores de ruído, alheios ao produtor, são factores incontrolláveis que afectam as características dos produtos, como por exemplo, variações causadas por condições ambientais (temperatura, humidade), possíveis contaminações, condições de utilização do produto e variações nas máquinas ou de operação, desgaste de ferramentas, etc. (Castela, 2009).

As características do produto dependem dos factores controláveis; no entanto, os factores de ruído causam-lhes perturbações. Os factores controláveis devem ser optimizados de tal forma que o resultado obtido seja robusto, ou seja, insensível ao factor de ruído.

A robustez dum produto depende da adequada escolha dos factores e respectivos níveis. As combinações entre os factores podem ser feitas variando um factor de cada vez, enquanto os restantes permanecem constantes, através de um factorial completo ou através de um factorial fraccionado, utilizando uma matriz ortogonal. (Castela, 2009).

Aplicando ao caso em estudo, foram atribuídos os factores e níveis às condições operatórias seleccionadas e os respectivos valores de operação (Tabela 5-2) para a secagem de madeira.

Tabela 5-2: Factores e respectivos níveis

Factores				
		A = Temperatura	B = Pressão	C = Velocidade do escoamento
		[°C]	[bar]	[m.s ⁻¹]
Níveis	1	125	1.0	2
	2	135	1.5	6
	3	145	2.0	10

A cada condição operatória foi atribuído uma letra simbolizando os factores considerados como relevantes para o processo de secagem da madeira. A cada um destes factores foram correspondidos três valores utilizados frequentemente neste tipo de processo.

Se fosse aplicado o método factorial completo iria obter-se 3³ combinações, ou seja, 27 combinações, e por conseguinte 27 resultados (Y_i), como mostra a Tabela 5-3 e a Tabela 5-4.

Tabela 5-3: Experiências em modo factorial

Experiências	A	B	C	Resultado
1	1	1	1	Y ₁
2	1	1	2	Y ₂
3	1	1	3	Y ₃
4	1	2	1	Y ₄
5	1	2	2	Y ₅
6	1	2	3	Y ₆
7	1	3	1	Y ₇
8	1	3	2	Y ₈
9	1	3	3	Y ₉
10	2	1	1	Y ₁₀
11	2	1	2	Y ₁₁
12	2	1	3	Y ₁₂
13	2	2	1	Y ₁₃
14	2	2	2	Y ₁₄
15	2	2	3	Y ₁₅
16	2	3	1	Y ₁₆
17	2	3	2	Y ₁₇
18	2	3	3	Y ₁₈
19	3	1	1	Y ₁₉
20	3	1	2	Y ₂₀
21	3	1	3	Y ₂₁
22	3	2	1	Y ₂₂
23	3	2	2	Y ₂₃
24	3	2	3	Y ₂₄
25	3	3	1	Y ₂₅
26	3	3	2	Y ₂₆
27	3	3	3	Y ₂₇

Tabela 5-4: Tabela de resultados em formato clássico

		C₁	C₂	C₃
A₁	B₁	Y ₁	Y ₂	Y ₃
	B₂	Y ₄	Y ₅	Y ₆
	B₃	Y ₇	Y ₈	Y ₉
A₂	B₁	Y ₁₀	Y ₁₁	Y ₁₂
	B₂	Y ₁₃	Y ₁₄	Y ₁₅
	B₃	Y ₁₆	Y ₁₇	Y ₁₈
A₃	B₁	Y ₁₉	Y ₂₀	Y ₂₁
	B₂	Y ₂₂	Y ₂₃	Y ₂₄
	B₃	Y ₂₅	Y ₂₆	Y ₂₇

Devido ao elevado número de ensaios, não se revelou viável aplicar este método, uma vez que implica um dispêndio de tempo muito elevado bem como de matéria-prima, energia, etc. Assim, a aplicação de um método factorial fraccionado é a hipótese mais exequível para testar, como é o caso das matrizes ortogonais, onde são testadas apenas uma fracção das combinações possíveis do planeamento factorial completo. Taguchi propôs várias matrizes ortogonais normalizadas –

$L_n(\text{níveis}^{\text{factor}})$. Nestas matrizes cada factor experimenta os diferentes níveis o mesmo número de vezes. O número de graus de liberdade é igual ao número de ensaios menos uma unidade. Cada grau de liberdade representa o estado entre os níveis, ou seja, num factor com três níveis, como é o caso, tem-se dois graus de liberdade. Uma matriz ortogonal permite a obtenção de informação com um menor número de ensaios comparativamente a um factorial completo. Pela análise dos resultados das combinações obtidas determina-se quais os factores que conduzem à melhor resposta, ou seja, aquela que mais se aproxima das características pretendidas. (Castela, 2009).

Neste caso concreto optou-se por realizar somente nove ensaios experimentais, correspondendo a uma matriz $L_9 (3^3)$ – nove experiências de três níveis e três factores. Assim, construindo a matriz obtém-se (Tabela 5-5):

Tabela 5-5: Matriz ortogonal $L_9 (3^3)$

Experiencias	A	B	C	Resultado
1	1	1	1	Y_1
2	1	2	2	Y_5
3	1	3	3	Y_9
4	2	1	2	Y_{11}
5	2	2	3	Y_{15}
6	2	3	1	Y_{16}
7	3	1	3	Y_{21}
8	3	2	1	Y_{22}
9	3	3	2	Y_{26}

Pode-se verificar que cada factor tem todos os níveis em igual número de vezes. Substituindo-se os níveis pelos valores das condições operatórias correspondentes, obtém-se (Tabela 5-6):

Tabela 5-6: Matriz ortogonal $L_9 (3^3)$, com os respectivos valores de utilização experimentação

Experiencias	A	B	C	Resultado
1	125	1.0	2	Y_1
2	125	1.5	6	Y_5
3	125	2.0	10	Y_9
4	135	1.0	6	Y_{11}
5	135	1.5	10	Y_{15}
6	135	2.0	2	Y_{16}
7	145	1.0	10	Y_{21}
8	145	1.5	2	Y_{22}
9	145	2.0	6	Y_{26}

Estas serão assim, as condições operatórias testadas neste trabalho.

6 REALIZAÇÃO EXPERIMENTAL E ANÁLISE INDIVIDUAL DE EXPERIÊNCIAS

Neste capítulo vão ser expostos, experiência a experiência, os resultados obtidos assim como uma análise geral respectiva. Convém referir que no Anexo C encontram-se para consulta, várias tabelas com o resumo dos resultados obtidos assim como particularidades das experiências efectuadas.

6.1 EXPERIÊNCIA 0 – SECAGEM CONVENCIONAL

Tabela 6-1: Condições operatórias da experiência 0

Condições operatórias T = 80°C, velocidade = 3 m.s ⁻¹ , pressão atmosférica
Sem injeção de água

Este trabalho experimental começou com uma experiência em condições operatórias típicas de secagem convencional. Esta experiência tem como objectivo observar o comportamento da estação de secagem, assim como obter um ponto de comparação entre as experiências realizadas a alta temperatura quer à pressão atmosférica quer à pressão acima da atmosférica.

Na Tabela 6-2 é apresentada a caracterização dimensional da tábua durante as várias etapas do processo.

Tabela 6-2: Caracterização dimensional da tábua 0 [mm]

Comprimento		Largura			Espessura					
a ₁	a ₂	b ₁	b ₂	b ₃	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆
Antes de cortar as amostras da tábua (09/03/2010)										
999	1000	152	151	152	25	25	24	24	25	25
Antes de cortar as amostras da tábua utilizadas										
795	794	152	151	152	25	25	24	24	24	25
Depois de cortar as amostras da tábua utilizadas (27/05/2010)										
715	714	152	151	152	25	25	24	24	24	25
Depois da secagem										
715	714	147	148	149	25	25	24	24	24	25
Diferença em percentagem										
0,0	0,0	3,3	2,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Até à fase de secagem, apenas foi alterada a dimensão do comprimento, devido ao corte das amostras para determinação da humidade inicial. Após a secagem, a tábua foi medida para cálculo das diferenças de dimensão que o processo possa ter provocado. Nesta experiência verificou-se que apenas a largura apresentou diferenças na dimensão.

Na Figura 6-1 A e B pode-se observar os valores determinados para a humidade inicial e final da tábua.

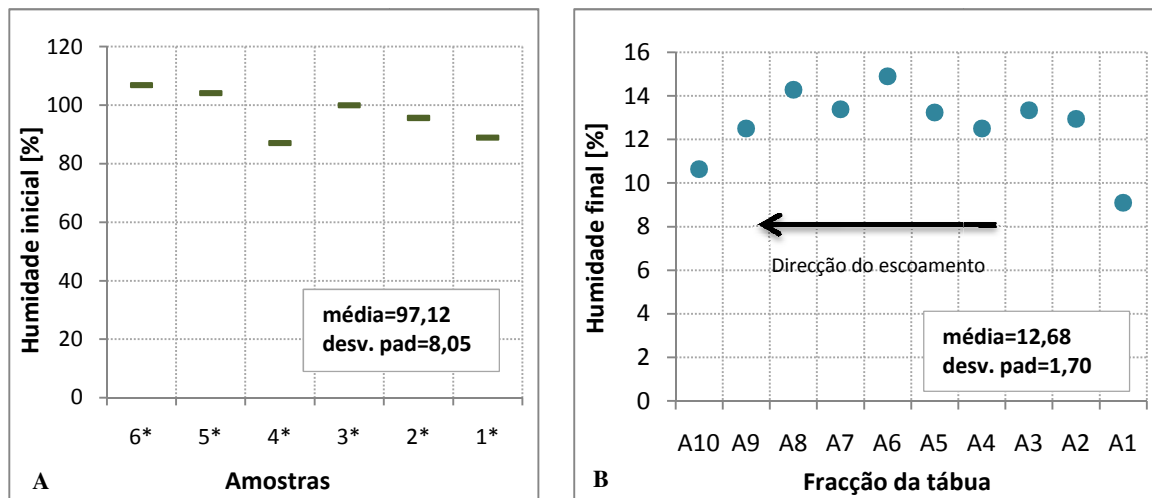


Figura 6-1: A – Humidade inicial da tábua 0; B – Humidade final da tábua 0

Esta experiência foi iniciada em Março de 2010; contudo, por motivos operacionais (mudança da ponta do sensor de humidade – Anexo E), não foi possível continuar esta experiência. Pela altura em que ficaram resolvidos estes problemas, decidiu-se proceder a corte de novas amostras da mesma tábua, para determinação da humidade inicial, uma vez que já havia passado algum tempo e a utilização das amostras cortadas em Março poderia acarretar alguns erros na determinação da humidade inicial. Estas novas amostras foram cortadas com dimensões diferentes do determinado pelo protocolo experimental, para que não houvesse uma diminuição excessiva do tamanho da tábua para secagem, em comparação com as restantes experiências.

Na determinação da humidade inicial da tábua, verifica-se que as duas extremidades estão relativamente equilibradas em conteúdo de humidade. Quanto à humidade final, observa-se que os valores nas extremidades são menores que no centro da tábua, o que traduz a maior facilidade de secagem nas extremidades. Este comportamento adequa-se a um comportamento típico de secagem, onde as extremidades secam mais facilmente que a parte central da tábua.

A Figura 6-2 traduz a localização das fracções e amostras da tábua. Nas fracções da tábua é assinalado o valor da diferença de humidade dessa fracção com o valor médio calculado.

Analisando a figura, observa-se que as fracções das extremidades são aquelas que perderam maior quantidade de humidade face ao valor médio da tábua, enquanto que as fracções do centro da tábua têm valores mais elevados de humidade face ao valor médio de humidade da tábua.

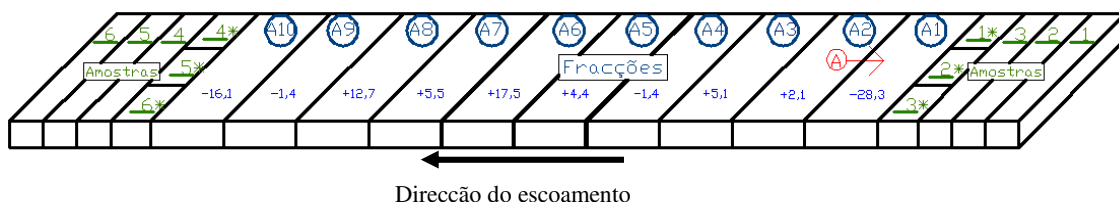


Figura 6-2: Localização das amostras e frações na tábua 0 e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %

Nas figuras seguintes (Figura 6-3 A e B, Figura 6-4), pode-se observar os gráficos referentes às condições operatórias da experiência.

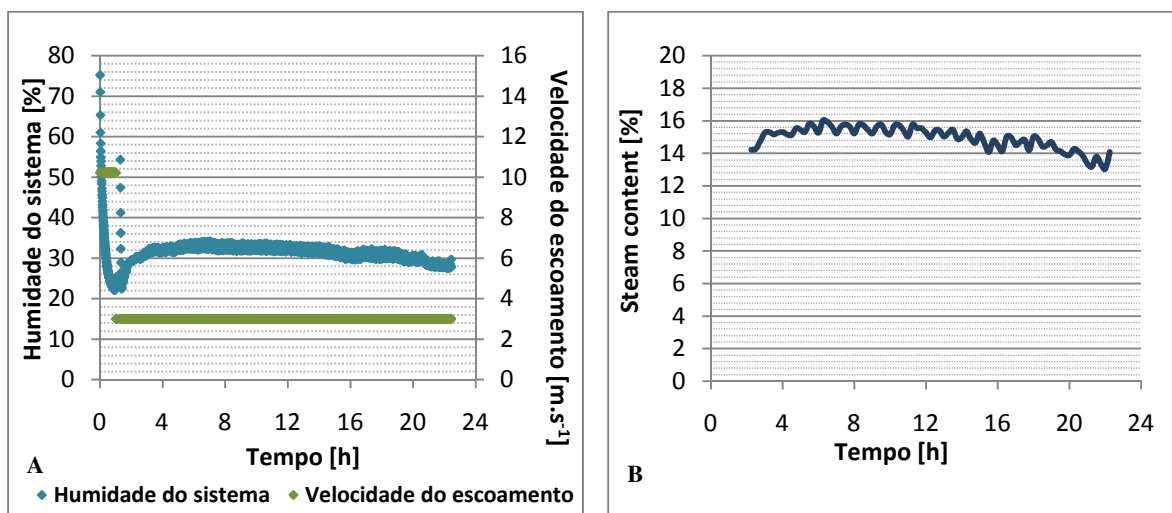


Figura 6-3: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 0; B – Evolução do steam content na experiência 0

Nos valores referentes à humidade verifica-se que, no início da experiência, a humidade do sistema situa-se à volta dos 75%, decrescendo rapidamente, o que coincide com o aquecimento da estação de secagem. Após aproximadamente 1 hora de experiência, foi aberta a tampa da estação de secagem pois o *software* não estava a adquirir os valores da leitura da célula de carga. Como se pensou que seria algum problema físico, abriu-se a tampa para verificar as condições da célula de carga e da tábua. Daí ter surgido o pico de HR à volta dos 55% e uma oscilação na temperatura do sistema e termopares.

Depois de se verificar que era um problema de *software*, resolveu-se esse problema e prosseguiu-se a experiência. Quando a temperatura pretendida é atingida, a velocidade de ventilação passa de 10 m.s⁻¹ para 3 m.s⁻¹. A partir deste momento verifica-se um aumento da humidade relativa do sistema. Com a estabilização da temperatura do sistema nos 80°C, podem ter-se formado condições para a libertação da humidade livre da tábua, sendo esta transferida para o ambiente circundante. A partir de cerca das 15 horas de funcionamento, a humidade do sistema começa a diminuir lentamente.

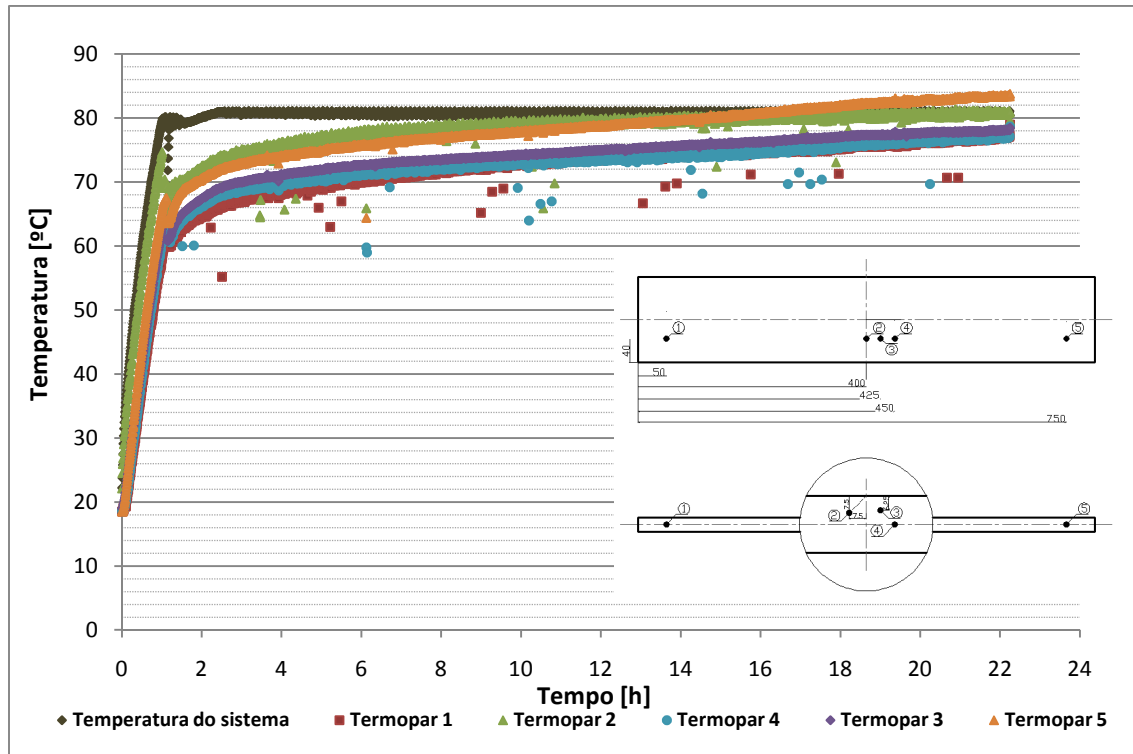


Figura 6-4: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 0

O valor do *steam content* foi calculado a partir do momento em que o sistema atinge a temperatura pretendida e, durante a experiência, mantém-se relativamente constante dentro da gama 13 a 16%.

Como nesta experiência a temperatura operatória é inferior à temperatura de saturação à pressão atmosférica, verifica-se que a diferença de temperaturas entre os diferentes locais da madeira e a temperatura do sistema é bastante reduzida desde o início da experiência, o que pode levar a prever uma humidade final da tábua mais elevada e um tempo de secagem muito maior.

Verificou-se que durante a experiência as temperaturas adquiridas pelos termopares são bastante semelhantes, independentemente da sua localização na tábua, o que traduz conteúdo de humidades com pouca variabilidade.

Pela análise das temperaturas adquiridas pelos termopares não se consegue observar em que fase exactamente é que a humidade da tábua diminuiu abaixo do PSF. Contudo, dado que a humidade final situa-se nos 12,68% (ao fim de 22,43 horas), é natural que esse ponto tenha sido alcançado, uma vez que, regra geral, o PSF situa-se na gama dos 20 a 30% de conteúdo em humidade.

Ao longo da aquisição dos dados verifica-se vários pontos que saem da tendência de temperatura, sendo esses pontos valores residuais de aquisição que não devem ser tidos em conta. Consegue-se observar também que o termopar 5 adquire valores mais elevados que os restantes termopares, devido à sua localização na extremidade mais próxima do início do escoamento. Contudo, neste

local observa-se uma subida acima dos valores de temperatura do sistema adquiridos pela sonda, devendo-se isto ao facto de serem aparelhos diferentes com calibrações diferentes, e talvez a imprecisões devido a transferências de calor ao longo do termopar (Panow & Nester, 1985). Esta situação é desvalorizada, após a verificação do funcionamento correcto do termopar, considerando então que as temperaturas lidas pelos termopares são concordantes com a temperatura do sistema medida pela sonda.

Na Figura 6-5 A e B pode-se observar a evolução da massa da tábua e do conteúdo médio de humidade, ao longo da experiência.

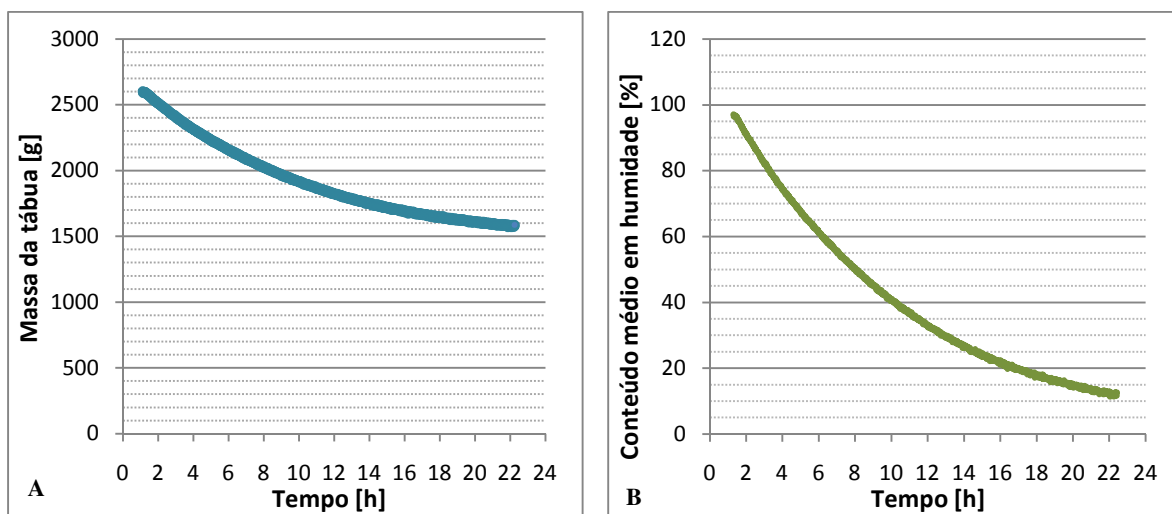


Figura 6-5: A – Massa da tábua 0; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 0

Como já foi referido anteriormente, devido a um problema de *software*, o sistema não estava a adquirir os valores da massa da tábua no início da experiência, explicando assim porque é que só existem valores a partir da 1ª hora de funcionamento da estação de secagem.

Analisando as figuras verifica-se que a massa da tábua vai diminuindo ao longo da experiência, na fase inicial, mais rapidamente, seguindo-se uma fase mais lenta. Durante a experiência a tábua perdeu cerca de 1013,7 g. O conteúdo de humidade médio diminui do valor inicial de 97,1% para o valor final de 12,7%. Verifica-se que a taxa de decréscimo do conteúdo de humidade segue a mesma tendência da massa da tábua sendo mais acentuada na fase inicial e mais lenta na fase final da experiência.

A Figura 6-6 A e B apresentam os valores da taxa de secagem, em função do tempo (fig A) e em função do conteúdo de humidade (fig. B).

No cálculo da taxa de secagem observou-se que as oscilações dos valores adquiridos pela célula de carga são devido ao movimento do ar provocado pela ventilação, o que tornava a curva da taxa de secagem extremamente irregular, impossibilitando a observação de qualquer tendência.

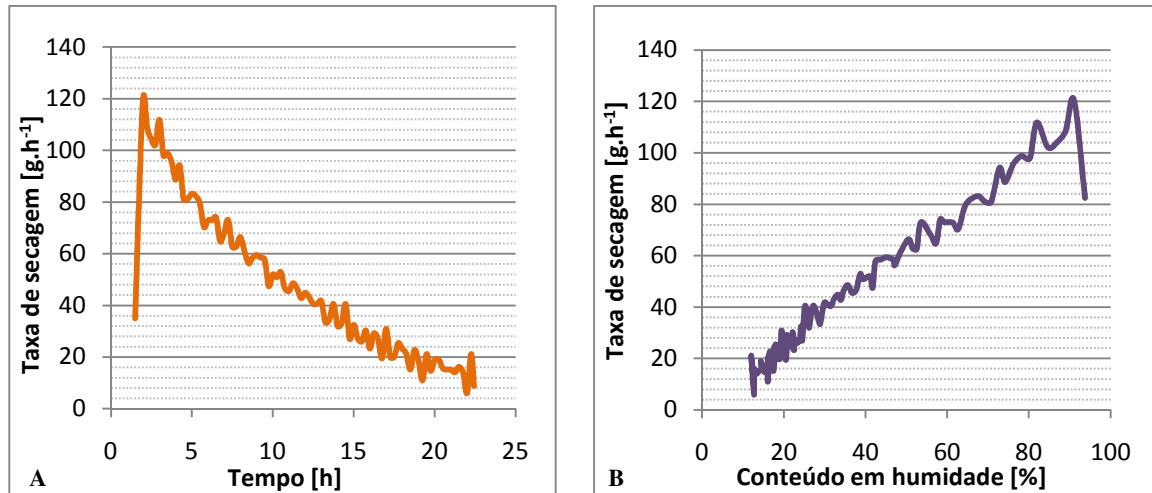


Figura 6-6: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade

Além disso, foram adquiridos grandes quantidades de valores durante a experiência. Assim, para colmatar esse problema, optou-se por calcular a taxa de secagem, utilizando médias de 0,25 em 0,25 horas (15 em 15 minutos).

Observa-se que a taxa de secagem não apresenta fase constante. Esta fase seria expectável, uma vez que a experiência realiza-se a temperatura média (80°C) e a humidade inicial encontra-se muito acima do ponto de saturação das fibras (Santos et al, 2003). A taxa de secagem máxima atingida é 120,59 g.h⁻¹ após 2 horas. O valor da taxa de secagem máxima é influenciado pelo facto de não se atingir temperaturas mais elevadas.

6.2 EXPERIÊNCIA 1

Tabela 6-3: Condições operatórias da experiência 1

Condições operatórias T = 125°C, velocidade = 2 m.s ⁻¹ , pressão atmosférica
Tempo de injeção = 1 seg; intervalo de injeção = 180 seg

Este trabalho experimental é o primeiro a ser realizado dos trabalhos estipulados pelo método de Taguchi, a alta temperatura e com injeção de água. Notou-se nesta experiência que houve bastante dificuldade da parte do sistema para atingir a temperatura que se pretende, demorando 5 horas só na fase de aquecimento. Devido a um problema de *software*, não foi possível fazer a quantificação da água introduzida no sistema, sabendo apenas que foi injectada durante 1 segundo a cada 180 segundos.

Na seguinte tabela é apresentada a caracterização dimensional da tábua, durante as várias fases do processo.

Tabela 6-4: Caracterização dimensional da tábua 1 [mm]

Comprimento		Largura			Espessura					
a ₁	a ₂	b ₁	b ₂	b ₃	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆
<i>Antes de cortar as amostras da tábua</i>										
996	996	152	154	152	25	25	25	25	25	25
<i>Depois de cortar as amostras da tábua</i>										
801	802,5	152	154	152	25	25	25	25	25	25
<i>Depois da secagem</i>										
797	799	148	149	147	24	24	25	25	24	24
Diferença em percentagem										
0,5	0,4	2,6	3,2	3,3	4,0	4,0	0,0	0,0	4,0	4,0

Após a secagem, verifica-se que todas as dimensões variaram excepto na espessura da parte central da tábua.

A Figura 6-7 A e B apresenta a humidade inicial e final calculadas.

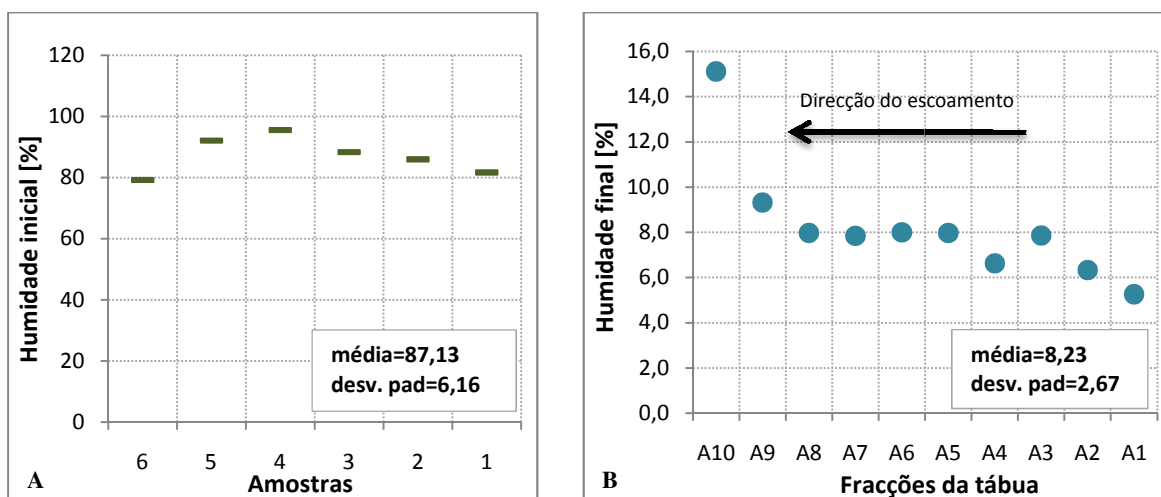


Figura 6-7: A – Humidade inicial da tábua 1; B – Humidade final da tábua 1

Observando a figura A, verifica-se que a humidade inicial da tábua 1 é relativamente menor face à tábua 0. Contudo verifica-se que continua a manter a homogeneidade de conteúdo em humidade nas duas extremidades. Já na determinação da humidade final da tábua, verifica-se uma grande diferença entre os valores das fracções da tábua entre extremidades. A extremidade mais próxima do início do escoamento apresenta um valor de humidade baixo, aumentando gradualmente à medida que se aproxima da extremidade oposta onde se verifica um valor extremamente elevado. Este facto pode ser provocado pela combinação de dois factores: distância do início do escoamento e proximidade do local de injeção de água.

Na Figura 6-8 verifica-se que foi a fracção A1 que perdeu maior quantidade de humidade comparando com o valor médio, enquanto que a fracção A10 tem um valor de humidade de 83,7% superior ao valor médio.

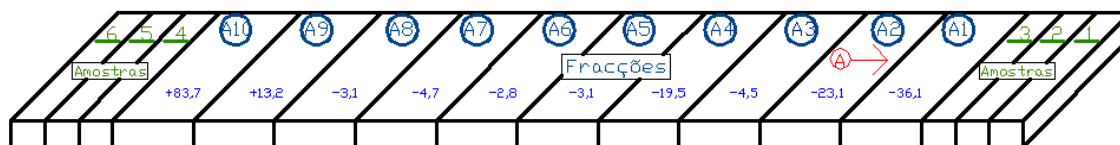


Figura 6-8: Localização das amostras e frações na tábua 1 e comparação com o valor médio de umidade final obtido, em %

As frações do centro da tábua ainda conseguiram perder umidade quando comparado com o valor médio.

Nas figuras seguintes (Figura 6-9 A e B, Figura 6-10), pode-se observar os gráficos referentes às condições operatórias da experiência.

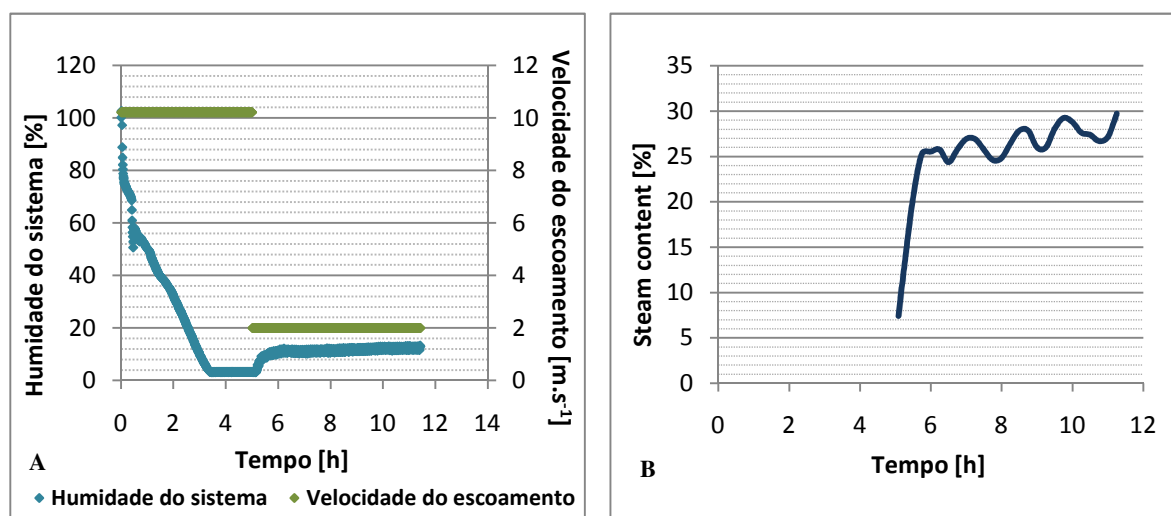


Figura 6-9: A – Evolução da umidade e velocidade do escoamento na experiência 1; B – Evolução do steam content na experiência 1

Na fase inicial da secagem verifica-se que a umidade da câmara diminui gradualmente até às 5 horas de funcionamento, coincidindo com a fase de aquecimento do sistema e libertação da umidade livre da tábua. Durante esta fase observa-se que os valores de temperatura adquiridos pelos termopares acompanham o aumento da temperatura do sistema até às 2 horas. Por esta altura começa-se a diferenciar a temperatura da superfície (L2) e a temperatura da extremidade mais próxima do início do escoamento (L5) das restantes, observando-se um gradiente de temperatura. A partir das 3,1 horas, observa-se que a temperatura da extremidade L5 atinge um plano horizontal constante, que corresponde à temperatura de bolbo húmido enquanto que a temperatura da superfície continua a aumentar, indicando que na fase de aquecimento, este local poderá ter passado o PSF. Nesta fase o conteúdo médio de umidade da tábua é 59%. As restantes zonas atingem este patamar um pouco mais tarde.

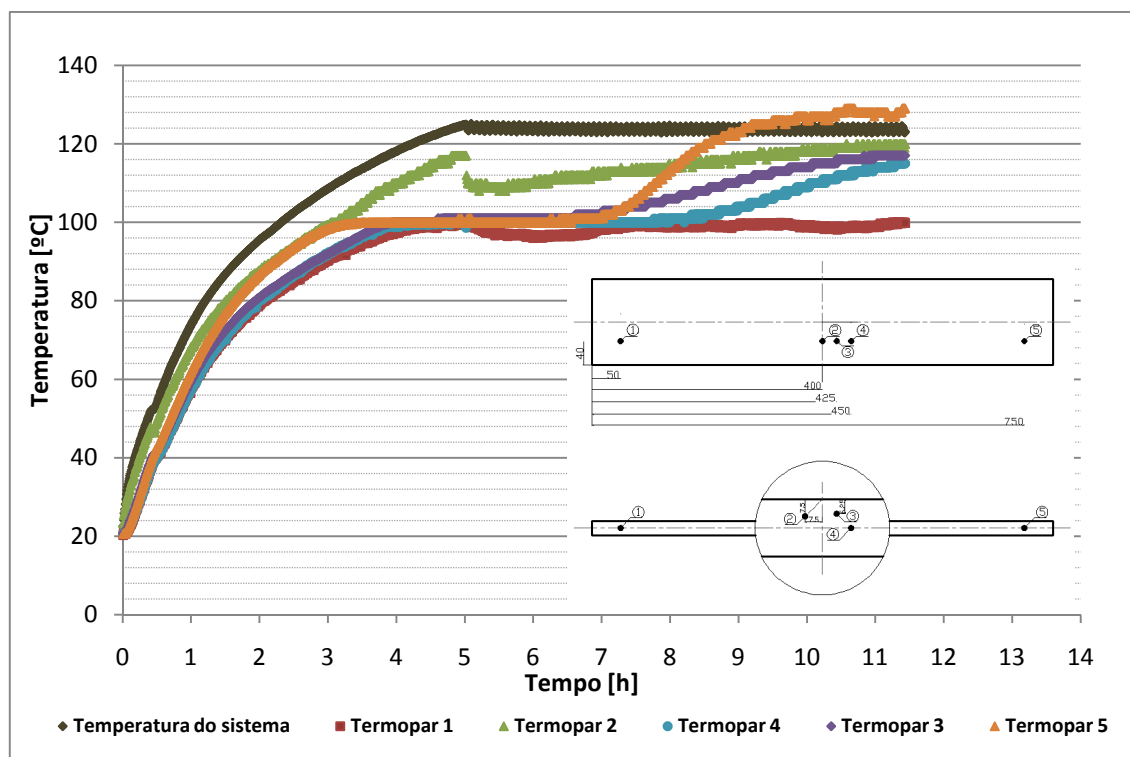


Figura 6-10: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 1

Isto pode significar um gradiente de humidade entre as várias localizações dos termopares. As temperaturas dos locais analisados, excepto a temperatura à superfície, permanecem neste patamar horizontal cerca de 30% do tempo da experiência.

Às 5 horas é atingida a temperatura pretendida do sistema. Verifica-se que existem pequenas variações em torno da temperatura de operação ao longo da experiência provocadas pelo ligar e desligar das resistências de aquecimento, para conseguirem manter a temperatura pretendida. Neste momento dá-se uma mudança de velocidade de ventilador de 10 m.s^{-1} para 2 m.s^{-1} . Observa-se também que a humidade do sistema aumenta, provocada pela injeção de água e por alguma humidade libertada da tábua, mantendo-se constante até ao final da experiência. Verifica-se também uma pequena oscilação da temperatura da superfície, podendo ser efeito de alguma movimentação provocada pela mudança brusca de velocidade de ventilação.

É a partir das 7 horas que se começam a verificar alterações ao comportamento da temperatura medida: a temperatura da extremidade do início do escoamento (L5) começa a aumentar atingindo a temperatura do sistema, indicando que o conteúdo de humidade dessa zona se situa abaixo do PSF. No mesmo instante, observa-se que a temperatura do local L3 (a 6,25 mm de distância da superfície) começa a aumentar. Após 1,5 horas, a temperatura do local L4, que se encontra no centro da tábua, começa também a aumentar. O gradiente de temperatura entre a superfície e o centro da tábua quando atinge o PSF é cerca de 15°C . No final da experiência os locais L2, L3, L4

e L5 encontram-se a temperaturas idênticas. A temperatura da extremidade mais distante do início do escoamento (L1) acaba por não sair do plano horizontal à temperatura de bolbo húmido, mantendo-se sempre numa situação de humidade próxima do PSF. Este facto é comprovado pelo cálculo da humidade final na fracção A10. Neste local será difícil atingir a temperatura de operação, uma vez que a proximidade ao ponto de injeção de água pode originar uma transferência de massa e impedir a subida da temperatura e a remoção da humidade. Em relação ao *steam content*, quando o sistema atinge a temperatura de operação, verifica-se um crescimento rápido do seu valor até 25%, após o qual mantém-se em crescimento lento até 30% até ao final da experiência.

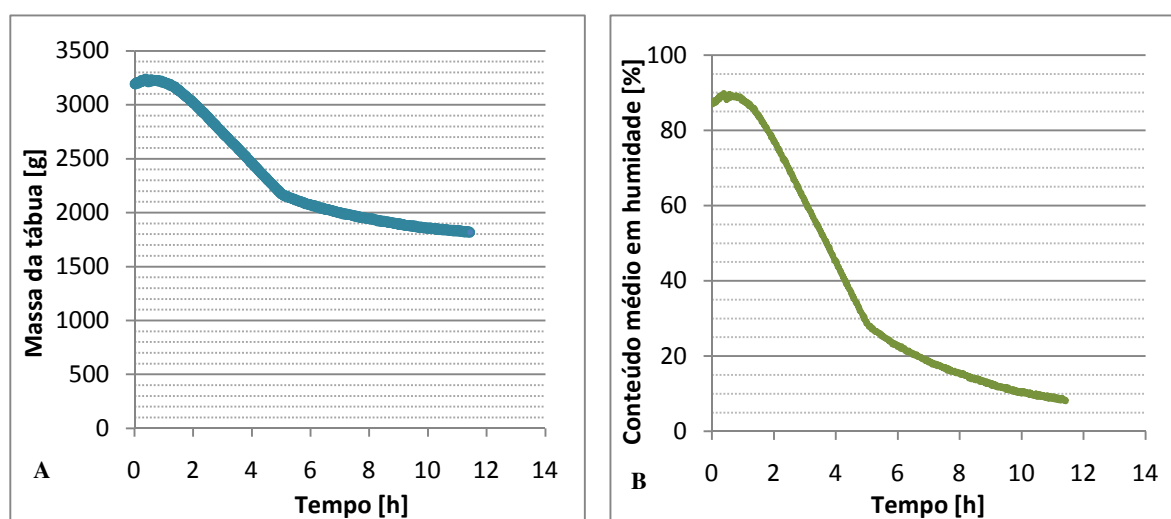


Figura 6-11: A – Massa da tábua 1; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 1

Analisando a figura anterior (Figura 6-11 – A e B) verifica-se que a massa da tábua vai diminuindo ao longo da experiência. Nos instantes iniciais observa-se um pequeno aumento da massa da tábua. Isto pode ter a influência de dois aspectos: (1) pela reacção da ventilação na célula de carga e um eventual ajuste dos apoios da tábua e (2) pela formação de condensados na tampa da estação de secagem que são transferidos para a tábua, situada abaixo da tampa, fazendo aumentar a sua massa. Verifica-se que numa fase inicial a diminuição é mais rápida, seguindo-se uma fase mais lenta. É de salientar que esta experiência passa por uma fase de aquecimento longa (5 horas), até atingir a temperatura pretendida, fazendo com que a tábua perca grande parte da humidade sem estar exactamente nas condições operatórias pretendidas. Esta pode ser a causa de uma mudança de tendência no declive da massa da tábua tão brusca. Durante a experiência a tábua perdeu cerca de 1374,5 g.

O conteúdo de humidade médio diminui do valor inicial de 87,13% (com um ligeiro aumento nos valores iniciais provocadas pelas oscilações de massa da tábua já referidas) para o valor final de 8,23% em 11,43 horas. Verifica-se que a taxa de decréscimo do conteúdo de humidade é mais

acentuada na fase inicial e mais lenta na fase final da experiência. Esta mudança de declive reflecte o ponto a partir do qual a humidade livre é quase toda removida e resta apenas a humidade de ligação. O conteúdo de humidade da tábua está directamente relacionado com a taxa de secagem (Figura 6-12).

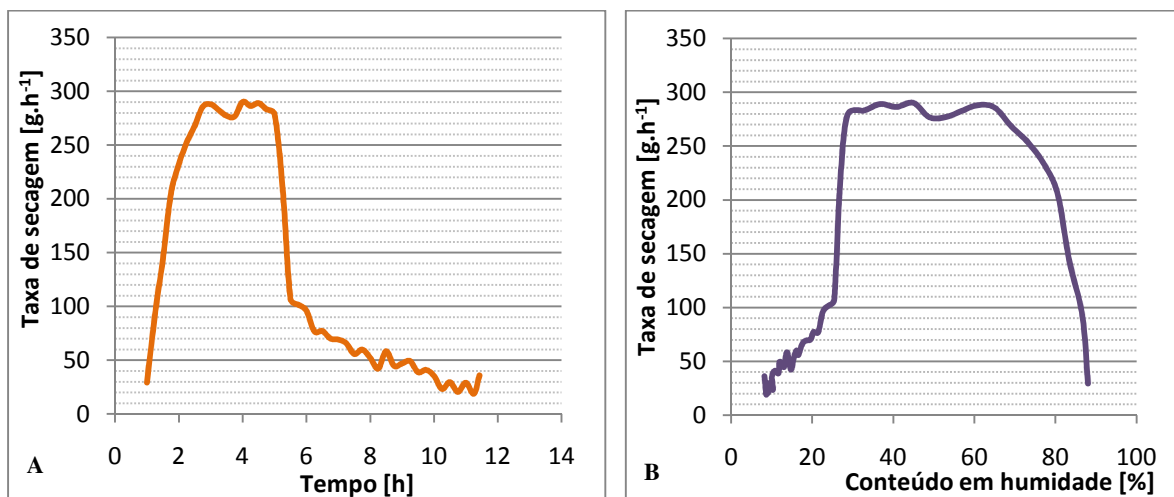


Figura 6-12: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade

Observando o gráfico da taxa de secagem, verifica-se que:

- Inicialmente verifica-se uma taxa de secagem negativa, devido à influência das oscilações da massa tábua no cálculo da taxa, já referido anteriormente; convém referir que nesta experiência, assim como nas experiências 6*, 6, 8 e 9, os primeiros valores calculados da taxa de secagem eram negativos, em virtude da influência do aumento inicial de massa, que já foi referido. Logo os valores negativos foram retirados da análise.
- A partir da 1 hora a taxa de secagem aumenta rapidamente atingindo o valor máximo de 290,31 g.h⁻¹, às 4h de funcionamento;
- A seguir passa por uma fase onde a taxa mantém-se relativamente constante, variando numa gama de valores de 276,81 a 290,31 g.h⁻¹ num intervalo de 2 horas, onde a humidade livre da tábua é removida a taxa constante. Este intervalo ainda pertence à fase de aquecimento do sistema, e, uma vez que o sistema demorou bastante tempo a atingir a temperatura de operação, a tábua foi perdendo humidade;
- Após esta fase, a taxa de secagem diminui rapidamente até 107,03 g.h⁻¹, coincidindo com o ponto em que o sistema atinge a temperatura de operação, a partir do qual decresce lentamente até ao valor final de 36,09 g.h⁻¹.

Relativamente à taxa de secagem em função do conteúdo de humidade verifica-se, uma taxa crescente rápida até cerca de 65% de humidade. Este facto é devido ao aumento da temperatura do sistema. Até a tábua atingir 30% em conteúdo de humidade, a taxa de secagem mantém-se relativamente constante. Isto pode traduzir a movimentação da água livre até à superfície e a sua remoção de forma constante até atingir o ponto de saturação das fibras aos 20% de conteúdo de humidade. Após os 20% de humidade, resta apenas a água de ligação na tábua. Como esta é mais difícil de remover, a taxa de secagem nesta fase diminui rapidamente.

6.3 EXPERIÊNCIA 2*

Tabela 6-5: Condições operatórias da experiência 2*

Condições operatórias T = 135°C (não foi atingida), velocidade = 6 m.s ⁻¹ , pressão atmosférica
Sem injeção de água (temperatura não atingida)

A experiência 2 é uma das experiências programadas no trabalho experimental, bastante semelhante à anterior, variando na temperatura final pretendida e na velocidade de escoamento. No entanto, esta não foi uma experiência conseguida uma vez que a estação de secagem não conseguiu atingir a temperatura de 135°C. Este problema foi causado pelo facto de não estar a ser utilizada a totalidade da potência eléctrica instalada na estação, que é de 12 kW, sendo que apenas aproximadamente 5 kW estavam a funcionar, provocando tempos demorados para atingir temperaturas mais elevadas e maior esforço das resistências uma vez que até atingirem a temperatura de operação encontram-se continuamente ligadas. Como não é atingida a temperatura pretendida, também não é injectada água para o sistema. Apesar desta experiência não ter sido conduzida até ao fim, é aqui também incluída, para análise dos dados obtidos dentro do possível.

Na seguinte tabela é apresentada a caracterização dimensional da tábua, durante as várias fases do processo.

Tabela 6-6: Caracterização dimensional da tábua 2* [mm]

Comprimento		Largura			Espessura					
a ₁	a ₂	b ₁	b ₂	b ₃	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆
Antes de cortar as amostras da tábua										
999	1001	152	154	153	25	25	24	24	24	24
Depois de cortar as amostras da tábua										
803	804	152	154	153	25	25	24	24	24	24
Depois da secagem										
798	799	146	148,5	146,5	24	24	23	23	23	23
Diferença em percentagem										
0,6	0,6	3,9	3,6	4,2	4,0	4,0	4,2	4,2	4,2	4,2

Após a secagem, verifica-se que todas as dimensões sofreram alterações.

As figuras seguintes (Figura 6-13 – A e B) apresentam a humidade inicial e final calculadas.

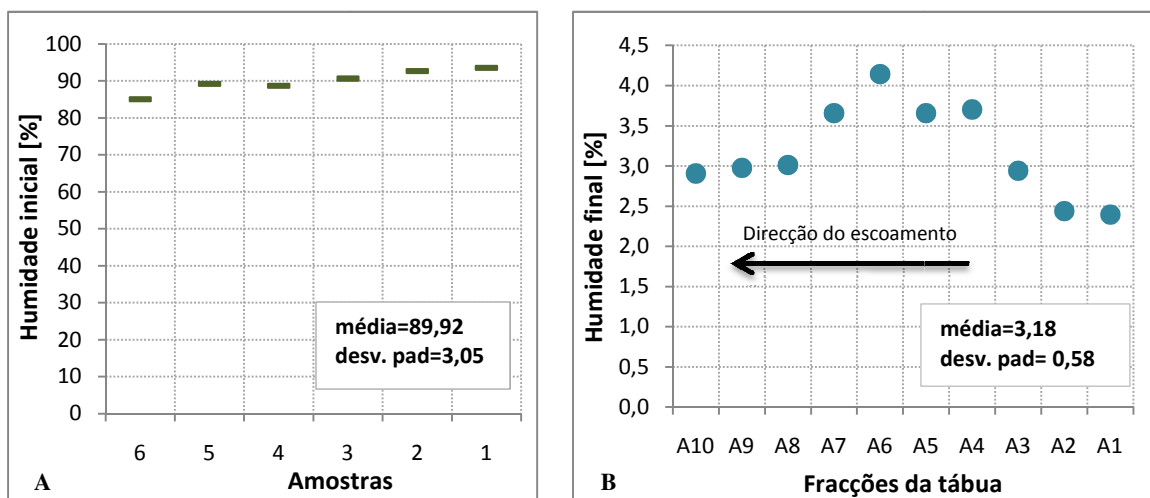


Figura 6-13: A – Humidade inicial da tábua 2*; B – Humidade final da tábua 2*

Analisando a humidade inicial da tábua verifica-se, em relação às experiências anteriores, que os valores são mais homogéneos. Na análise da humidade final, observa-se que existem diferenças entre os valores das extremidades e centro da tábua, sendo estes os que apresentam valores mais elevados, provavelmente devido à maior dificuldade de secagem no centro da tábua que nas extremidades. Tal como a experiência 0, que não injectou água, a humidade final segue um comportamento idêntico. Comparando agora, com a experiência anterior, verifica-se que nessa, os valores são bastante mais dispersos e que as grandes diferenças residem em valores entre as extremidades da tábua, o que não se verifica neste caso.

Em relação ao valor médio (Figura 6-14), verifica-se que foi a fracção A1 que perdeu maior quantidade de humidade, enquanto que a fracção A6 tem um valor de humidade superior ao valor médio. As fracções do centro da tábua não conseguiram perder humidade quando comparadas com o valor médio.

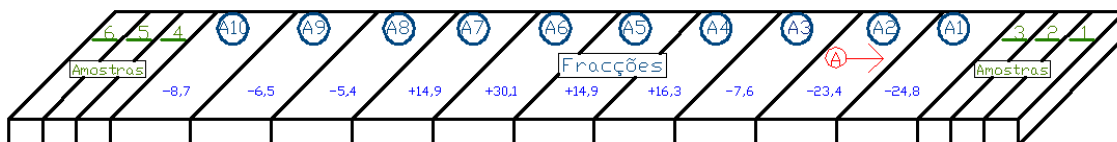


Figura 6-14: Localização das amostras e fracções na tábua 2* e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %

Nas figuras seguintes (Figura 6-15, Figura 6-16), pode-se observar os gráficos referentes às condições operatórias da experiência.

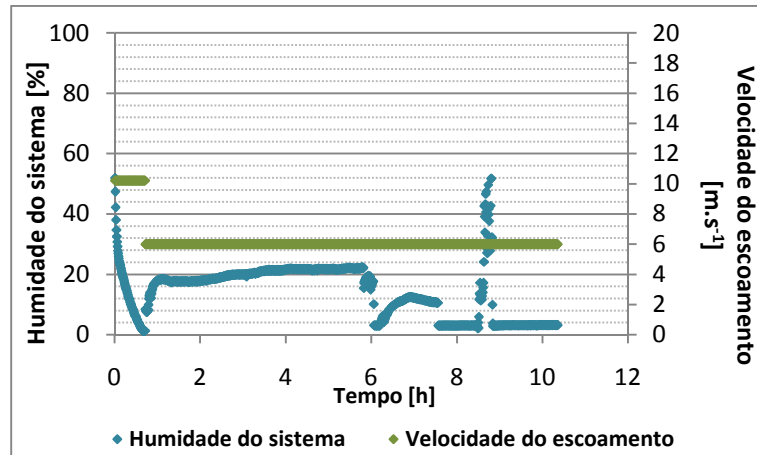


Figura 6-15: Evolução da humidade e velocidade do escoamento durante a experiência 2*

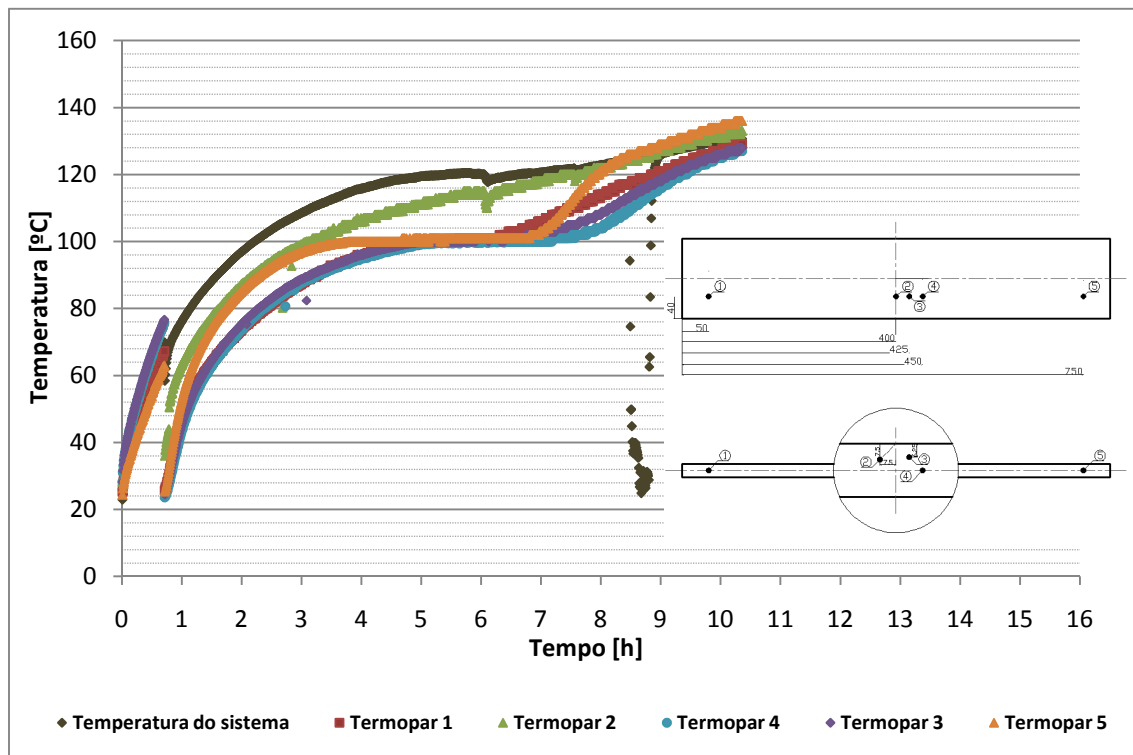


Figura 6-16: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 2*

Nesta experiência, optou-se por alterar um ponto do protocolo experimental. Como foi observado, na experiência 1, o sistema demorou cerca de 5 horas a atingir a temperatura de operação. Para evitar que a tábua permanecesse muito tempo dentro da câmara de secagem sem esta ter atingido as condições operatórias pretendidas, optou-se por fazer um pré-aquecimento até o sistema atingir a temperatura de 70°C, com velocidade de escoamento de 10 m.s^{-1} . Quando o sistema chegou aos 70°C, colocou-se a tábua para secagem dentro da câmara e procedeu-se à continuação da experiência mas já com a velocidade de 6 m.s^{-1} , ou seja, não se esperou que o sistema chegasse à temperatura esperada (135°C) para fazer a mudança de velocidades do ventilador. Só mais tarde se

veio a verificar que o problema estaria no facto de o sistema não estar a utilizar a totalidade da potência eléctrica instalada. Além disso, a introdução da tábua na câmara de secagem já em funcionamento não seria muito prática uma vez que as temperaturas eram demasiado altas para permitir uma introdução segura por parte do operador e o calor escapava-se rapidamente pela abertura.

Analisando agora o gráfico das condições operatórias, tem-se:

- A velocidade de ventilação mantém-se constante nos 10 m.s^{-1} , até cerca de 1 hora, altura em que atinge a temperatura estipulada para a pré-aquecimento (70°C). Neste momento, a velocidade de ventilação altera para 6 m.s^{-1} (velocidade pretendida para a experiência), mantendo-se constante até ao final.
- A humidade do sistema vai decrescendo rapidamente durante a fase de pré-aquecimento, até aproximadamente zero; as temperaturas do sistema e as temperaturas adquiridas pelos termopares aumentam simultaneamente.
- Depois de 0,7 horas de funcionamento, a estação de secagem é parada para se proceder à introdução da tábua. A abertura da câmara de secagem reflectiu-se na diminuição da temperatura do sistema. Verifica-se também uma diminuição da temperatura lida pelos termopares devido à sua introdução na tábua, que se encontra a temperaturas mais baixas (temperatura ambiente).
- Após a introdução da tábua e à alteração da velocidade de ventilação, a humidade registada do sistema aumenta até cerca de 20%, mantendo-se constante até cerca das 6 horas de funcionamento, no momento em que existe uma quebra de humidade relativa que poderá ter sido causada pela abertura da câmara de secagem.
- Como, durante a experiência se observou que o sistema estava com dificuldades para atingir a temperatura pretendida, foi retirada a sonda de temperatura e humidade para verificar se haveria algum problema no seu interior e aberta a estação para verificar o seu funcionamento, provocando por isso, algumas oscilações na leitura dos valores.
- Analisando a leitura dos termopares, observa-se que a temperatura à superfície (L2) não estabiliza na temperatura de bolbo húmido, como acontece com os outros locais, podendo concluir-se que a humidade livre à superfície da tábua foi rapidamente removida e a superfície atingiu o PSF muito cedo. De facto, o conteúdo de humidade da tábua nesta fase ainda é 61%, às 3,3 horas, o que é bastante similar ao obtido na experiência anterior. A partir desta hora, observa-se que a temperatura da extremidade situada próxima do início

do escoamento (L5) atinge a temperatura de bolbo húmido sendo seguida pelos locais L1, L3 e L4, 1 hora depois. Isto evidencia um gradiente de humidade entre a extremidade no início do escoamento e os restantes locais. A temperatura dos locais L1, L3, L4 e L5 mantêm-se na temperatura de bolbo húmido até às 6,7 horas, correspondendo a 25% do tempo total da experiência. A partir desta fase, os primeiros locais a destacarem-se e aumentar de temperatura são os localizados nas extremidades (L1 e L5) o que poderá ser provocado pelo facto de não ter havido injeção de água e pela maior facilidade de secagem nas extremidades, como já foi observado na Figura 6-13 - B. As temperaturas dos locais situados no centro da tábua são as últimas a deixar o patamar, igualando depois a temperatura do sistema.

- A partir das 7,6 horas a humidade relativa é muito baixa, o que coincide com o momento em que todos os locais atingem ou já atingiram o PSF. Isto torna evidente que a humidade verificada no sistema provém da humidade livre removida da tábua, sendo que, após atingir o PSF, a tábua liberta menos quantidade de humidade para o ambiente circundante, e por conseguinte faz diminuir a humidade relativa.
- Como durante mais de 10 horas o sistema não conseguiu atingir os 135°C, a experiência foi interrompida.

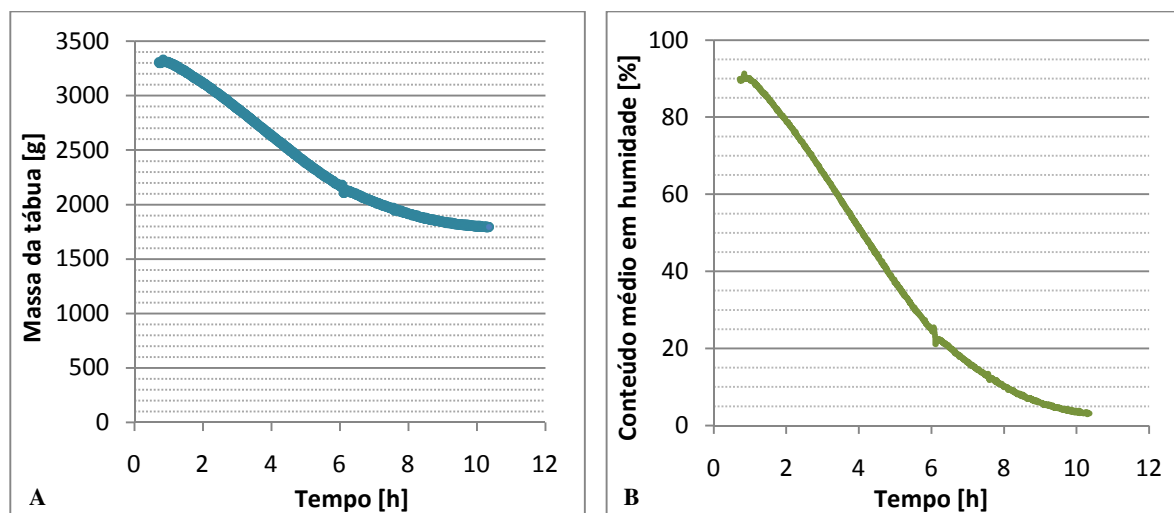


Figura 6-17: A – Massa da tábua 2*; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 2*

Analisando o gráfico da evolução da massa da tábua (Figura 6-17 – A) verifica-se que esta decresce, numa primeira fase mais rapidamente e depois mais lentamente. Como a tábua foi introduzida quase 1 hora após o começo da experiência, os valores da sua massa são apenas apresentados após esse momento. A tábua perdeu 1512,4 g durante a experiência.

Quanto ao conteúdo de humidade médio (Figura 6-17 – B), há uma diminuição do valor inicial de 89,9% para o valor final de 3,2% em 10,36 horas. Verifica-se que a taxa de decréscimo do

conteúdo de humidade é mais acentuada na fase inicial e mais lenta na fase final da experiência. Foi obtido um valor de humidade final baixo, provavelmente pelo motivo de não ter havido injeção de água, o que provoca uma diferença de equilíbrio de humidade entre a tábua e o ambiente de secagem, fazendo com que a humidade da tábua seja mais facilmente removida.

As figuras seguintes (Figura 6-18 – A e B) apresentam os valores da taxa de secagem, em função do tempo (fig A) e em função do conteúdo de humidade (fig. B).

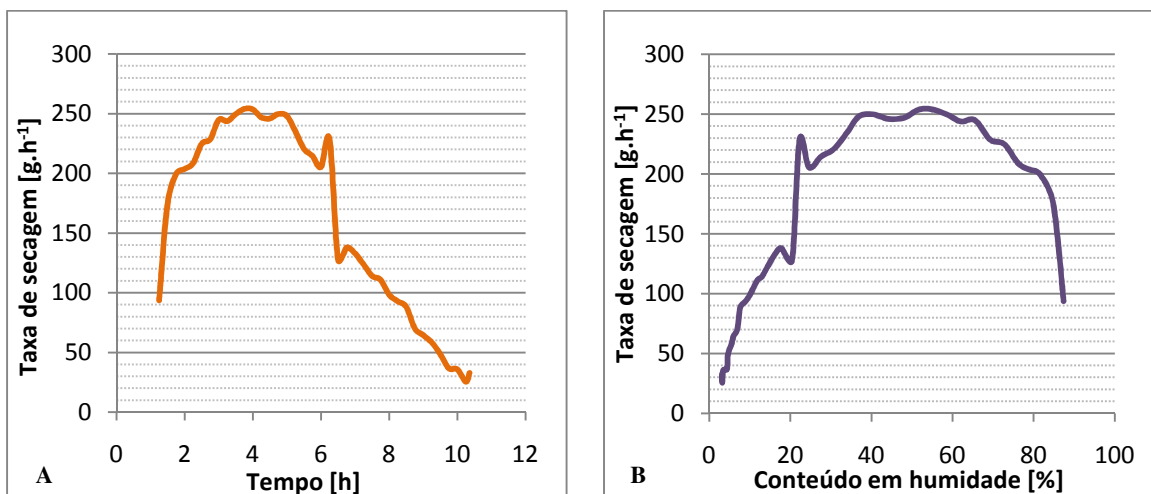


Figura 6-18: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade

Durante o processo ocorrem três fases: uma 1ª fase em que a taxa cresce rapidamente, com um declive mais acentuado, atingindo o seu ponto máximo (254,07 g.h⁻¹), seguido de uma fase constante, sendo que a partir das 5 horas decresce até ao final do processo de secagem. Este patamar constante ocorre devido ao aquecimento lento que o sistema teve, o que provocou uma taxa de remoção de humidade constante. Verifica-se, contudo, que o término deste patamar ocorre perto dos 30% de conteúdo em humidade, ponto esse que corresponde ao ponto de saturação das fibras. Como o aumento de temperatura do sistema se processou de forma lenta, observa-se na taxa de secagem, a formação de um patamar de taxa constante, onde a humidade livre é removida.

6.4 EXPERIÊNCIA 2

Tabela 6-7: Condições operatórias da experiência 2

Condições operatórias T = 135°C, velocidade = 6 m.s ⁻¹ , pressão atmosférica
Tempo de injeção = 1 seg; intervalo de injeção = 180 seg

Esta experiência foi realizada após ultrapassar o problema das resistências de aquecimento mencionado anteriormente e ter os 12kW de potência eléctrica instalada operacionais. Foi realizada exactamente com as mesmas condições operatórias da experiência anterior. Fez-se contudo, uma

alteração ao protocolo experimental, não diferenciando a fase de aquecimento e fase de secagem com velocidades diferentes, mantendo-se, portanto, toda a experiência à velocidade de operação.

Na seguinte tabela é apresentada a caracterização dimensional da tábua, durante as várias fases do processo.

Tabela 6-8: Caracterização dimensional da tábua 2 [mm]

Comprimento		Largura				Espessura				
a ₁	a ₂	b ₁	b ₂	b ₃	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆
<i>Antes de cortar as amostras da tábua</i>										
1000	1000	151	151	151	28	28	27	27	25	25
<i>Depois de cortar as amostras da tábua</i>										
802	803	151	151	151	28	28	27	27	25	25
<i>Depois da secagem</i>										
801	800	145	143	145	27	27	25	25	24	24
Diferença em percentagem										
0,1	0,4	4,0	5,3	4,0	3,6	3,6	7,4	7,4	4,0	4,0

Após a secagem, verifica-se que todas as dimensões sofreram alterações principalmente a espessura da parte central da tábua.

As figuras seguintes (Figura 6-19 – A e B) apresentam a humidade inicial e final calculadas.

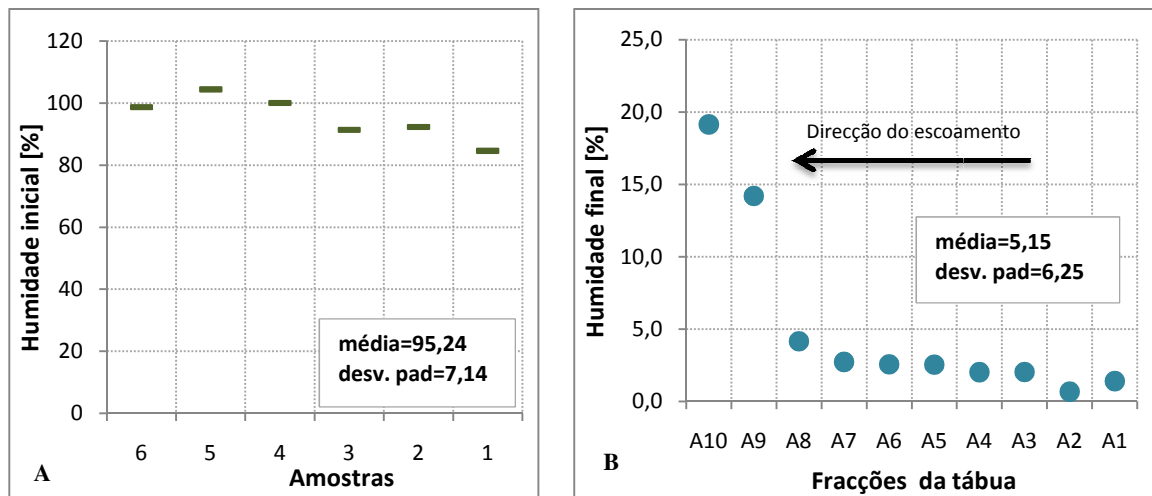


Figura 6-19: A – Humidade inicial da tábua 2; B – Humidade final da tábua 2

Na análise à humidade inicial, observa-se que, embora possua uma variabilidade superior à experiência anterior, não parece que seja suficientemente elevada para condicionar algum comportamento de secagem. Na humidade final verifica-se uma grande diferença entre a extremidade mais distante do início do escoamento e as restantes fracções da tábua. Este facto pode ser provocado pela distância ao início do escoamento e pela proximidade do local de injeção de água. É de relembrar que na experiência anterior, em que não foi injectada água, este comportamento não se verificou, observando-se uma semelhança entre valores de humidade nas duas extremidades.

Em relação ao valor médio (Figura 6-20), verifica-se que foi a fracção A2 que perdeu maior quantidade de humidade, enquanto que a fracção A10 tem um valor de humidade de 271,7% superior ao valor médio.

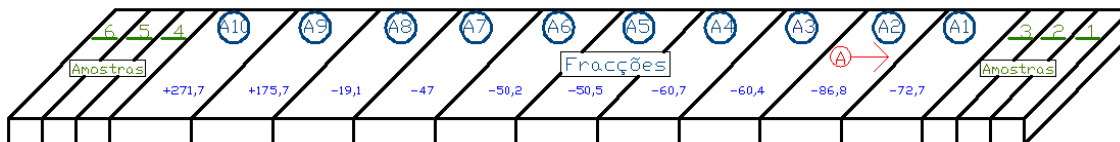


Figura 6-20: Localização das amostras e fracções na tábua 2 e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %

Todas as fracções da tábua, excepto a A9 e A10, perderam quantidades consideráveis de humidade face ao valor médio calculado.

Nas figuras seguintes (Figura 6-21 – A e B), pode-se observar os gráficos referentes às condições operatórias da experiência.

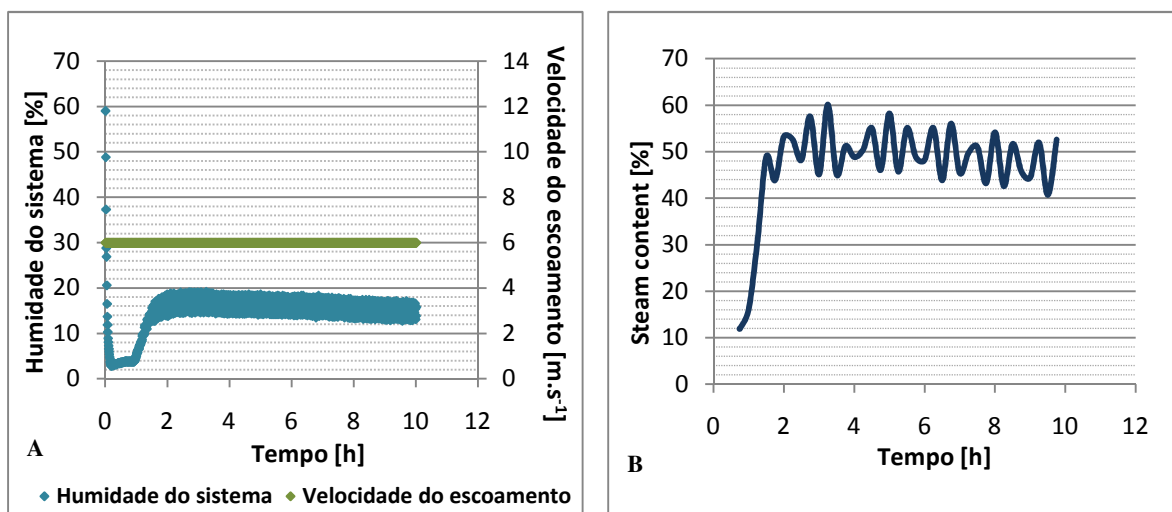


Figura 6-21: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 2; B – Evolução do steam content na experiência 2

Inicialmente observa-se uma diminuição brusca da humidade do sistema, coincidindo com a fase de aquecimento da câmara de secagem. A fase de aquecimento foi bastante mais rápida, durando cerca de 1 hora, comparando com as 5 horas de aquecimento da experiência 1.

Após o sistema ter atingido a temperatura de 135°C, começa a injeção de água, provocando um aumento na humidade relativa, até cerca de 20%. Verifica-se que este valor é alvo de variação dentro de uma gama (entre 14% e 20%) devido à influência da injeção de água durante 1 segundo a cada 180 segundos. Contudo, observa-se que a humidade relativa vai diminuindo lentamente acabando por chegar, no final da experiência, à gama de 12%-18%.

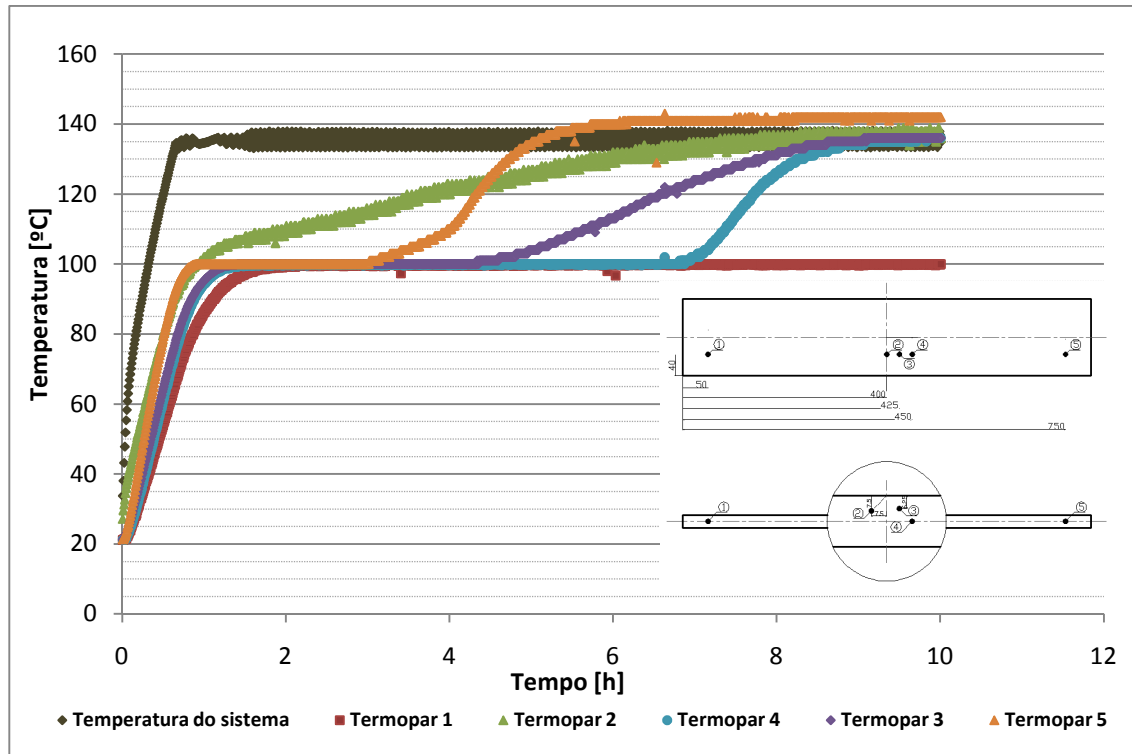


Figura 6-22: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 2

Isto pode ser explicado pelo facto de os locais analisados irem atingindo gradualmente o PSF, fazendo com que a humidade libertada da tábua para o ambiente circundante seja cada vez menor. Durante toda a experiência, a velocidade de escoamento manteve-se constante nos 6 m.s^{-1} . O *steam content* também mantém-se na gama 40 – 60% durante a experiência.

Analisando, então, o comportamento das temperaturas medidas tem-se:

- Após o aquecimento do sistema, observa-se que as temperaturas lidas pelos termopares estabilizam nos 100°C (temperatura de bolbo húmido) excepto a de superfície (L2), que continua a aumentar de temperatura gradualmente até atingir os 135°C no final da experiência. Isto significa que a superfície da tábua atingiu o PSF durante o aquecimento. Neste momento, a tábua ainda possui um conteúdo de humidade médio de 89%. Este valor é superior aos valores obtidos nas experiências anteriores devido ao aquecimento da câmara ser mais rápido e o sistema não ter tempo para remover mais humidade, antes de atingir a temperatura pretendida.
- Os restantes locais permanecem à temperatura de bolbo húmido durante 1,5 horas que corresponde a 15% do tempo total da experiência, valor que é bastante inferior aos valores das experiências anteriores. Após este período, a extremidade perto do início do escoamento (L5), atinge o PSF e começa a aumentar a sua temperatura até à temperatura

do sistema. Neste momento, a humidade média da tábua é de 52,6%, ou seja, desde o PSF do local L2 até ao PSF do local L5 a tábua perdeu cerca de 36,4% de humidade.

- Este comportamento é seguido pelo local L3, a 6,25 mm de profundidade, passadas 1,4 horas, e depois pelo local L4, no centro da tábua, 2,5 horas depois. Neste momento, o conteúdo de humidade médio da tábua é 13,6%. O gradiente da temperatura entre a superfície e o centro da tábua durante a secagem foi bastante pronunciado alcançando um valor de 32°C, que corresponde à diferença de temperatura de bolbo seco e temperatura de bolbo húmido.
- A temperatura da extremidade oposta ao início do escoamento (L1) não aumenta, mantendo-se no valor de bolbo húmido até ao final da experiência. Este comportamento é devido uma vez mais à proximidade do local de injeção de água e da distância ao início do escoamento. Isto é também comprovado pela análise anterior à humidade final da tábua, na fracção A10.

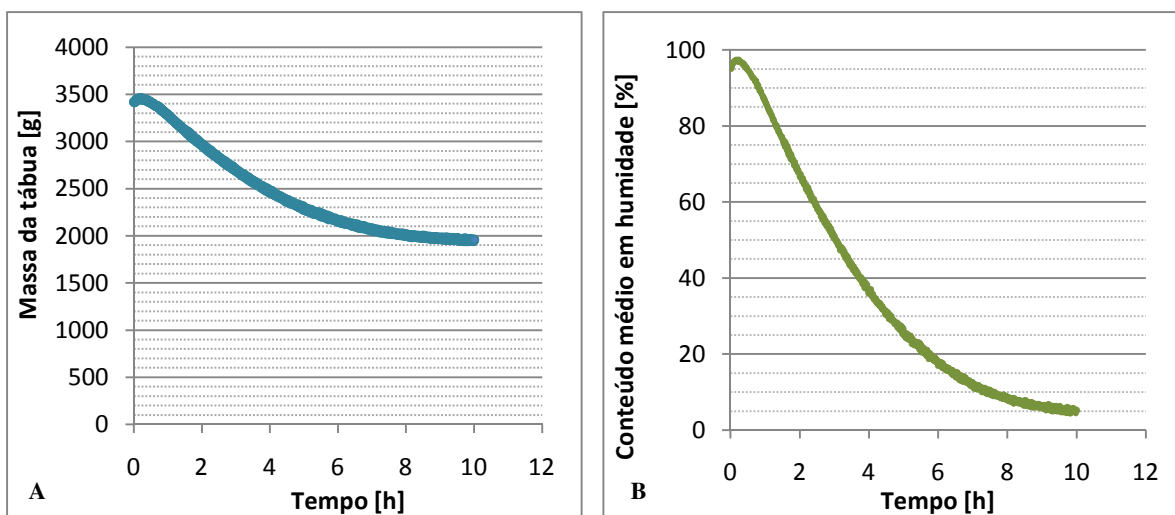


Figura 6-23: A – Massa da tábua 2; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 2

Após os momentos iniciais, verifica-se que a massa da tábua (Figura 6-23 - A) diminui mais acentuadamente, tendendo a estabilizar no final da experiência, atingindo massa constante. Durante a experiência, a tábua perdeu cerca de 1463,7 g.

O valor médio do conteúdo de humidade (Figura 6-23 - B) diminuiu desde o valor inicial de 95,2% para um valor final de 5,2% em cerca de 10 horas. A diminuição foi mais rápida durante a etapa inicial passando depois a diminuir mais lentamente com o progresso da secagem.

As figuras seguintes (Figura 6-24 – A e B) apresentam os valores da taxa de secagem, em função do tempo (fig A) e em função do conteúdo de humidade (fig. B).

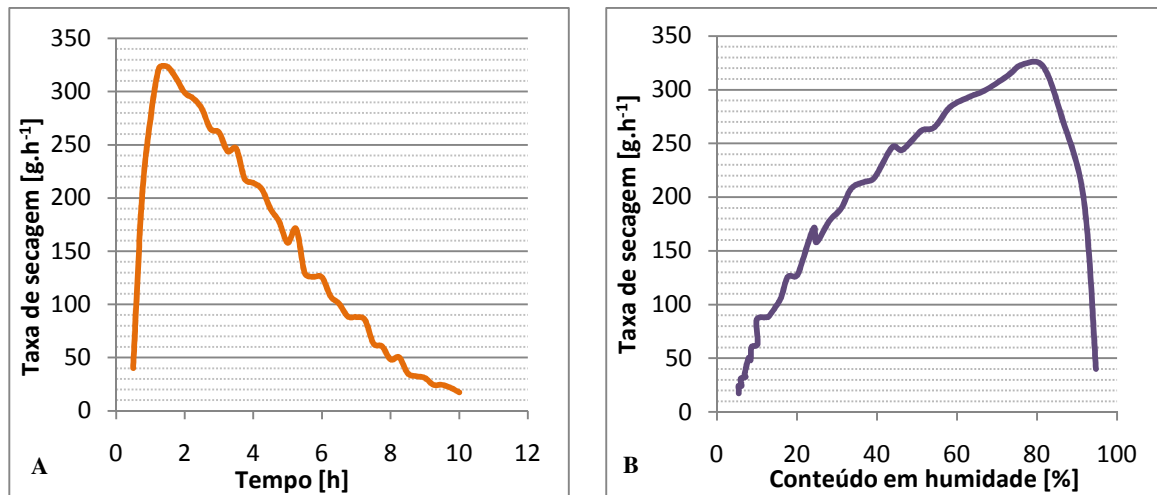


Figura 6-24: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade

Durante o processo ocorrem duas grandes fases: verifica-se uma 1^a fase em que a taxa cresce rapidamente, com um declive mais acentuado, atingindo valores mais elevados quando o sistema atinge a temperatura pretendida, seguindo-se depois, uma fase decrescente, mais lenta. O valor da taxa de secagem mais elevado observado é 323,3 g.h⁻¹, sendo que a partir desse valor decresce até ao final do processo de secagem.

Nesta experiência não se verificou um patamar constante de taxa de secagem nos momentos iniciais, pois como se alcançou a temperatura pretendida num curto espaço de tempo, o conteúdo de humidade da superfície decresceu rapidamente, fazendo com que seja difícil de ocorrer esse patamar de taxa constante.

A taxa de secagem começa a decrescer de forma menos acentuada até aos 24% em conteúdo de humidade, para depois decrescer mais rapidamente até ao final do ensaio como se verifica na figura seguinte.

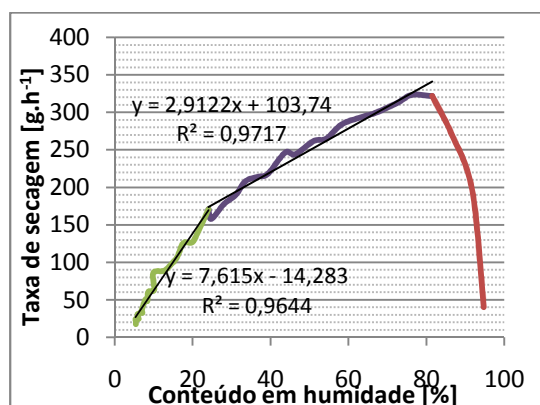


Figura 6-25: Diferentes declives da taxa de secagem

Comparando as rectas de ajuste nas duas fases em que a taxa de secagem decresce, verifica-se que o declive da recta da fase inicial é menor 2,6 vezes.

6.5 EXPERIÊNCIA 3

Tabela 6-9: Condições operatórias da experiência 3

Condições operatórias T = 145°C, velocidade = 10 m.s ⁻¹ , pressão atmosférica
Tempo de injeção = 1 seg; intervalo de injeção = 180 seg

Este trabalho experimental é o último a ser realizado na gama de pressão atmosférica, a alta temperatura e com injeção de água. Nesta experiência notou-se uma grande dificuldade em manter a humidade relativa mais elevada, provocada provavelmente pela elevada temperatura e baixa quantidade de água injectada.

Na seguinte tabela é apresentada a caracterização dimensional da tábua, durante as várias fases do processo.

Tabela 6-10: Caracterização dimensional da tábua 3 [mm]

Comprimento		Largura			Espessura					
a ₁	a ₂	b ₁	b ₂	b ₃	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆
<i>Antes de cortar as amostras da tábua</i>										
999	1000	151	151	151	25	25	25	25	26	26
<i>Depois de cortar as amostras da tábua</i>										
805	804	151	151	151	25	25	25	25	26	26
<i>Depois da secagem</i>										
803	802	143	144	145	23	23	23,5	24	24	24
Diferença em percentagem										
0,2	0,2	5,3	4,6	4,0	8,0	8,0	6,0	4,0	7,7	7,7

Após a secagem, verifica-se que todas as dimensões sofreram alterações principalmente a espessura e largura da tábua.

As figuras seguintes (Figura 6-26 – A e B) apresentam a humidade inicial e final calculadas.

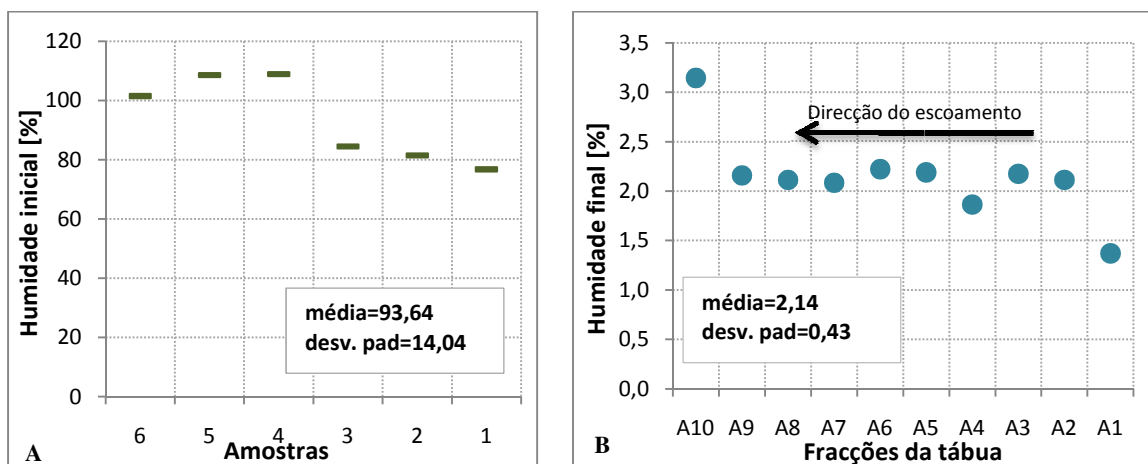


Figura 6-26: A – Humidade inicial da tábua 3; B – Humidade final da tábua 3

Da análise da humidade inicial, verifica-se que existe uma diferença de conteúdo de humidade entre as duas extremidades da tábua, podendo ser provocada por uma abertura no isolamento das tábuas enquanto estavam armazenadas, ou ser então uma característica da própria madeira. Verifica-se também uma grande diferença entre os valores das fracções da tábua entre extremidades, na humidade final. A extremidade mais próxima do início do escoamento apresenta um valor de humidade mais baixo e a extremidade oposta tem um valor mais elevado, sendo que as fracções do meio têm valores de humidade relativamente constantes.

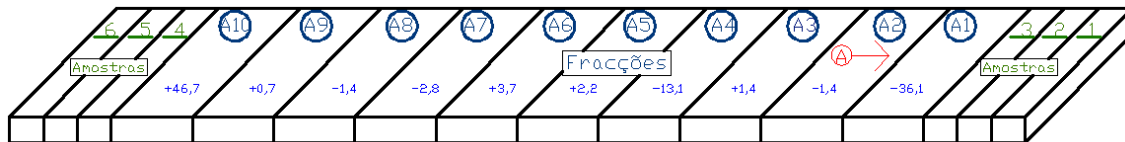


Figura 6-27: Localização das amostras e fracções na tábua 3 e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %

Conforme o observado no gráfico da humidade final, a amostra da extremidade mais perto do início do escoamento tem um valor inferior ao valor médio em 36,1%, enquanto que a extremidade oposta tem um valor de humidade superior ao valor médio em 46,7%. Os valores das fracções do centro a tábua mostram-se relativamente constantes em relação ao valor médio calculado, excepto a amostra A4, que possui um valor de humidade bastante inferior ao valor médio. Este facto pode ser explicado pela existência nesta fracção de dois nós. Esta área já é seca logo a fracção vai ficar com um teor de humidade menor, como se pode observar na fotografia seguinte.



Figura 6-28: Nós na fracção A4

Nas figuras seguintes (Figura 6-29 – A e B, Figura 6-30), pode-se observar os gráficos referentes às condições operatórias da experiência.

Pela análise dos gráficos, pode-se observar que na fase de aquecimento, a humidade do sistema decresceu rapidamente, até atingir o valor próximo de zero. Mesmo após o sistema alcançar a temperatura de 145°C (temperatura pretendida para esta experiência) e começar a injeção de água, durante 1 segundo a cada 3 minutos, não foi suficiente para conseguir manter uma humidade mais elevada, mantendo-se muito próxima de zero até ao final da experiência. A velocidade de ventilação manteve-se constante nos 10 m.s⁻¹.

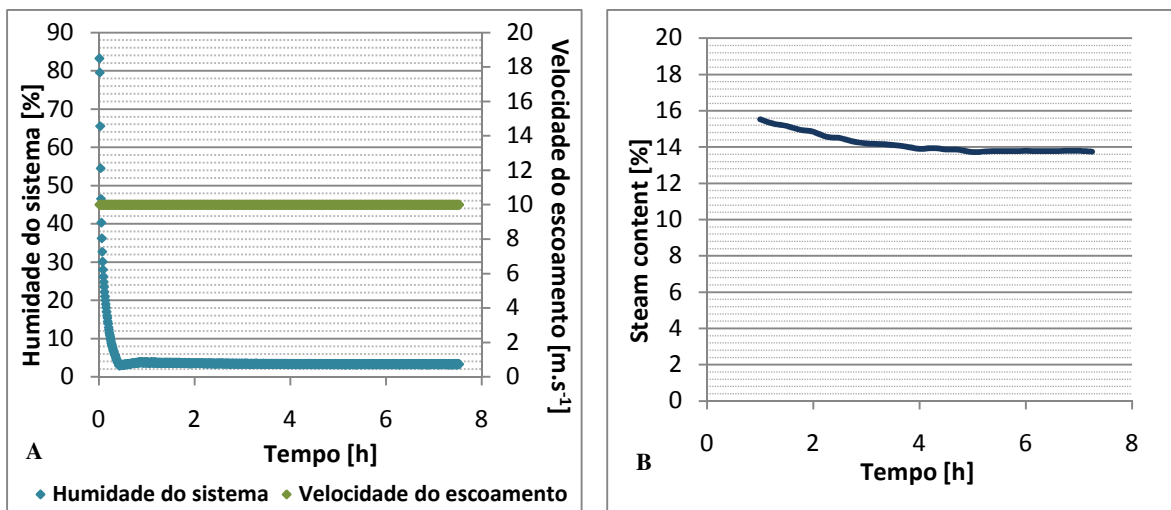


Figura 6-29: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 3; B – Evolução do *steam content* na experiência 3

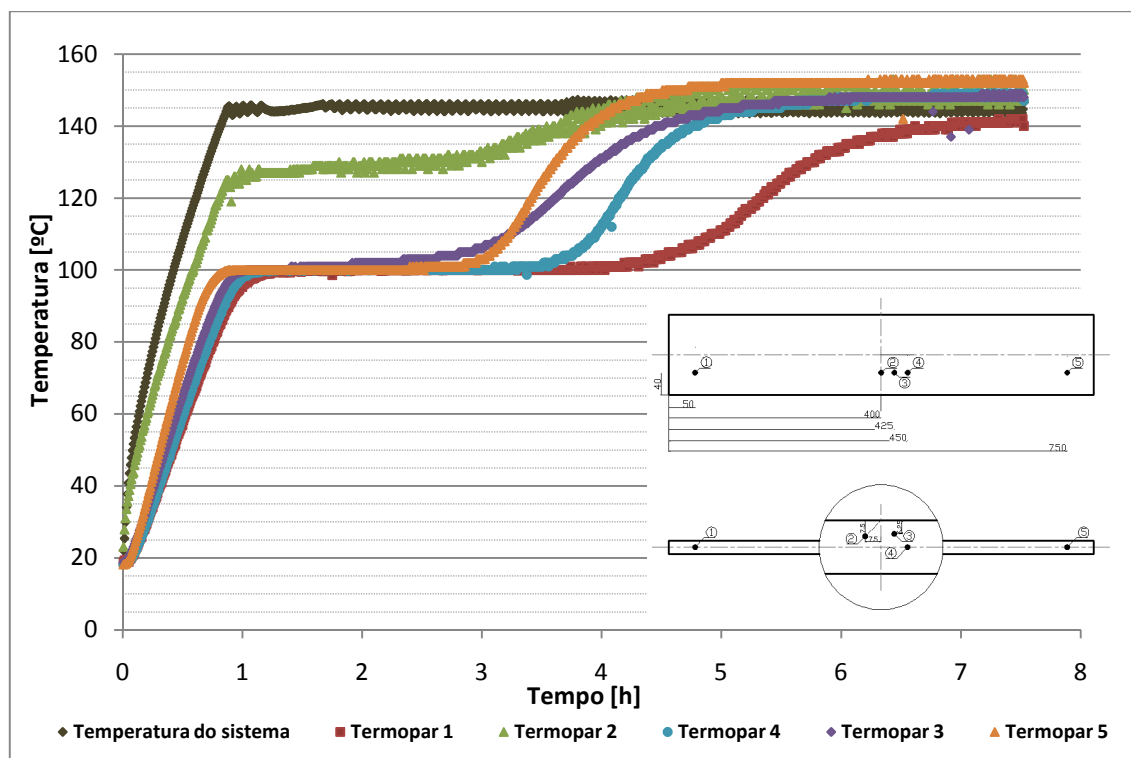


Figura 6-30: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 3

O *steam content* decresceu de 15,5% até 13,5% durante as primeiras 3 horas após o sistema atingir a temperatura de operação, mantendo-se constante nesse valor até o final da experiência.

Quanto ao comportamento das temperaturas, tem-se que:

- À medida que o sistema vai aquecendo, verifica-se que a temperatura lida pelos termopares também vai aumentando, sendo que a leitura do termopar situado à superfície (L2) é

superior até 25°C dos restantes termopares. O sistema demorou cerca de 1,14 horas a atingir a temperatura pretendida.

- Às 1,1 horas de funcionamento, as temperaturas de todos os locais estabilizaram num plano horizontal nos 100°C (temperatura de bolbo húmido) excepto o local L2 (à superfície), cujo valor de temperatura continua a aumentar até atingir 125°C. A partir deste ponto, a temperatura do L2 aumenta lentamente até aos 130°C, atingindo às 3 horas. Após esta fase mais lenta de crescimento, o valor da temperatura aumenta mais rapidamente até atingir o valor da temperatura do sistema.
- As temperaturas dos restantes locais encontram-se estabilizadas na temperatura de bolbo húmido durante 0,7 horas, correspondendo a 10% do tempo da experiência, sendo que a partir deste momento o local situado a 6,25 mm de profundidade (L3) começa a aumentar a sua temperatura e a destacar-se dos valores lidos pelos restantes termopares. Esta tendência é seguida pelo local mais próximo do início do escoamento (L5), pelo local no centro da tábua (L4) e por fim pelo local na extremidade oposta ao início do escoamento (L1). O facto de atingirem o PSF em tempos diferentes evidencia a existência de gradientes de humidade em diferentes zonas da tábua. Todos estes locais acabam por atingir a temperatura de operação no final da experiência. Curiosamente, verifica-se que o L3 começa a aumentar a sua temperatura antes do L5, o que contraria o que se tem observado até agora nas outras experiências. Este facto pode ser provocado pela heterogeneidade da madeira e a diferente distribuição de zonas secas.
- Durante a experiência verificou-se um gradiente de temperatura de 40°C entre a superfície e o centro da tábua, que comparando com as experiências anteriores, é mais elevado. Verificou-se também que o L1 apenas conseguiu ultrapassar o PSF nesta experiência devido à elevada temperatura utilizada, mesmo com injeção de água.

Após os momentos iniciais, verifica-se que a massa da tábua (Figura 6-31 – A) diminui mais acentuadamente, tendendo a estabilizar no final da experiência, atingindo massa constante. Durante a experiência, a tábua perdeu cerca de 1406,9 g.

O valor médio do conteúdo de humidade diminuiu (Figura 6-31 – B) desde o valor inicial de 93,6% para um valor final de 2,1% em cerca de 7,52 horas. A diminuição foi mais rápida durante as etapas iniciais passando depois a diminuir mais lentamente com o progresso da secagem.

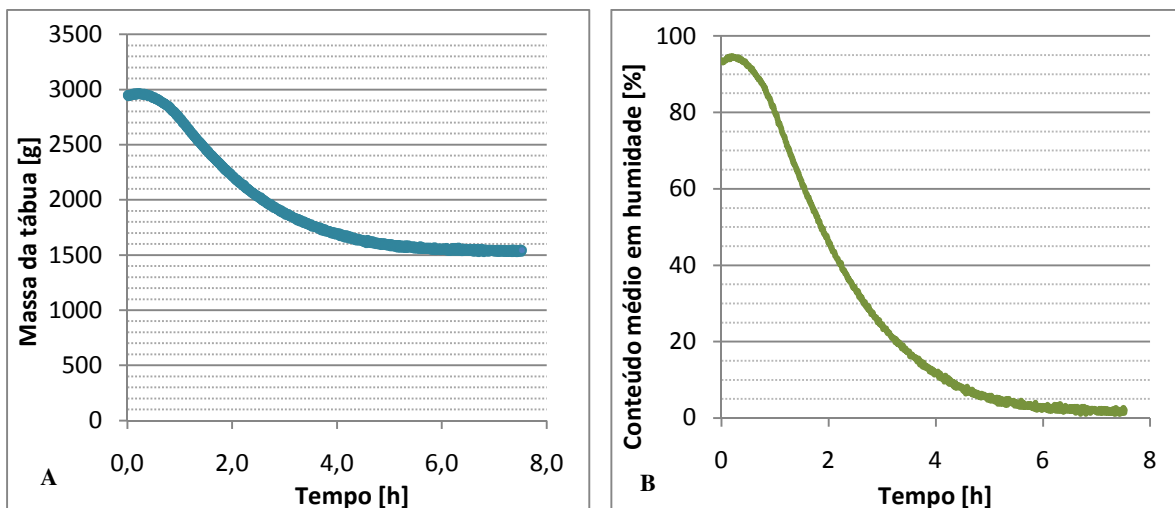


Figura 6-31: A – Massa da tábua 3; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 3

As figuras seguintes (Figura 6-32 – A e B) apresentam os valores da taxa de secagem, em função do tempo e em função do conteúdo de humidade.

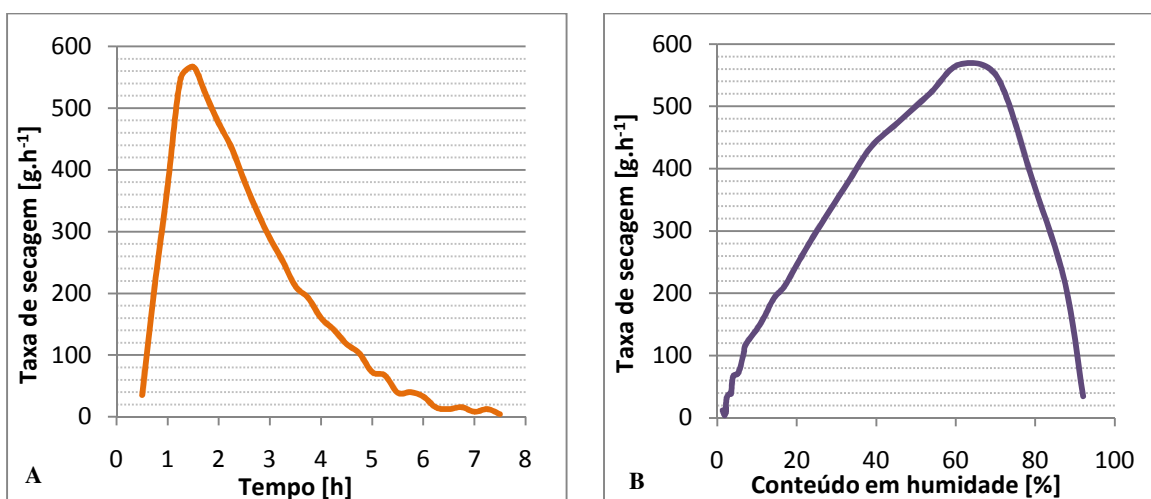


Figura 6-32: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade

Durante o processo ocorrem duas grandes fases: verifica-se uma 1ª fase em que a taxa cresce rapidamente, com um declive mais acentuado, atingindo um máximo após o sistema alcançar a temperatura pretendida, seguindo-se depois, uma fase decrescente. O valor da taxa de secagem mais elevado observado é $567,17 \text{ g.h}^{-1}$, sendo que a partir desse valor, decresce rapidamente até à 5ª hora de funcionamento, após a qual começa a decrescer lentamente até ao final do processo de secagem.

Devido ao rápido aumento da temperatura do sistema, a fase constante de taxa de secagem não acontece neste ensaio. Verifica-se também que a taxa de secagem começa a decrescer de forma

menos acentuada até aos 6,6% em conteúdo de humidade, para depois decrescer mais rapidamente até ao final do ensaio como se verifica na Figura 6-33.

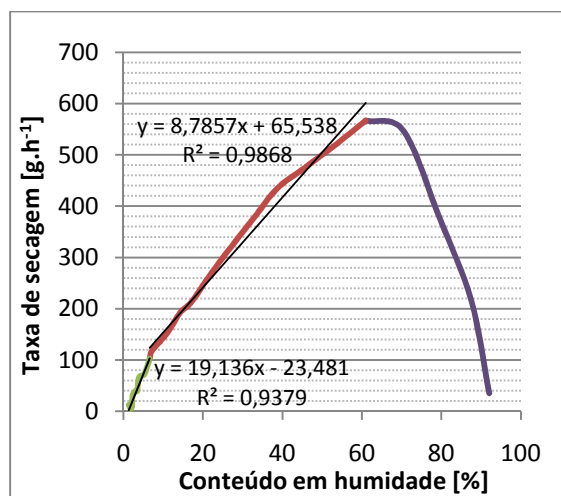


Figura 6-33: Diferentes declives da taxa de secagem

Comparando as rectas de ajuste nas duas fases em que a taxa de secagem decresce, verifica-se que o declive da recta da fase inicial é menor 2,17 vezes.

6.6 EXPERIÊNCIA 4

Tabela 6-11: Condições operatórias da experiência 4

Condições operatórias $T = 125^{\circ}\text{C}$, velocidade = 6 m.s^{-1} , pressão absoluta = 1,5 bar
Tempo de injeção = 1 seg; intervalo de injeção = 180 seg; volume total de água injectada = $2,4 \text{ dm}^3$

A experiência 4 foi a primeira experiência a ser realizada em modo pressurizado.

Na seguinte tabela é apresentada a caracterização dimensional da tábua, durante as várias fases do processo.

Tabela 6-12: Caracterização dimensional da tábua 4 [mm]

Comprimento		Largura				Espessura				
a_1	a_2	b_1	b_2	b_3	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
<i>Antes de cortar as amostras da tábua</i>										
999	999	151	152	153	24	24	24	24	24	24,5
<i>Depois de cortar as amostras da tábua</i>										
803	803	151	152	153	24	24	24	24	24	24,5
<i>Depois da secagem</i>										
803	802	143	144	145	23	23	23,5	24	24	24
Diferença em percentagem										
0,0	0,1	5,3	5,3	5,2	4,2	4,2	2,1	0,0	0,0	2,0

Após a secagem, verifica-se que onde existiu maior variação foi nas dimensões da largura e espessura.

As figuras seguintes apresentam a humidade inicial e final calculadas.

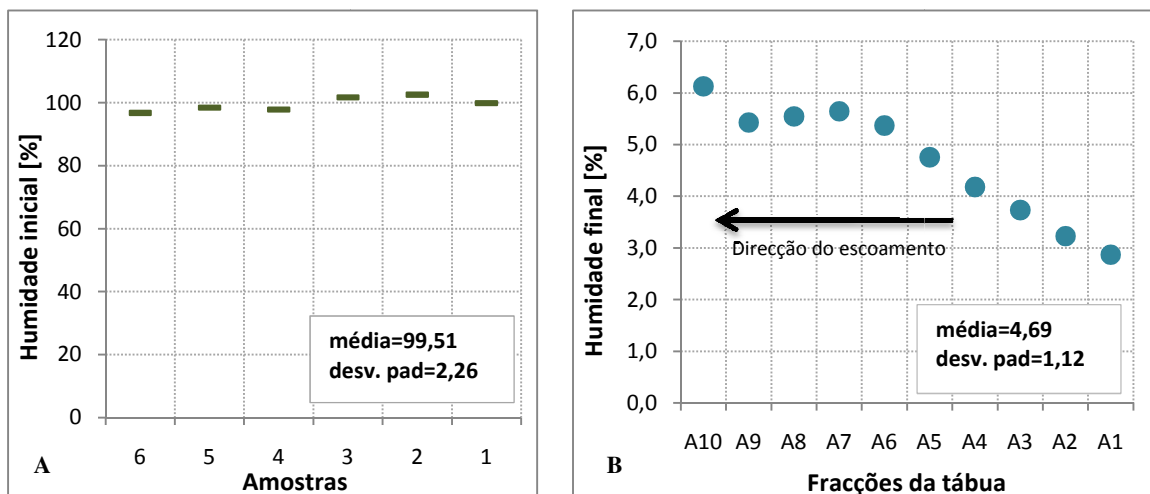


Figura 6-34: A – Humidade inicial da tábua 4; B – Humidade final da tábua 4

Observa-se uma elevada homogeneidade da humidade inicial das duas extremidades da madeira. Já na humidade final, verifica-se uma grande diferença de valores das fracções da tábua entre extremidades. Enquanto que a extremidade da tábua mais próxima do início do escoamento apresenta valores de humidade mais baixos, este valor vai aumentando à medida que a fracção se aproxima do centro. A extremidade oposta tem um valor mais elevado.

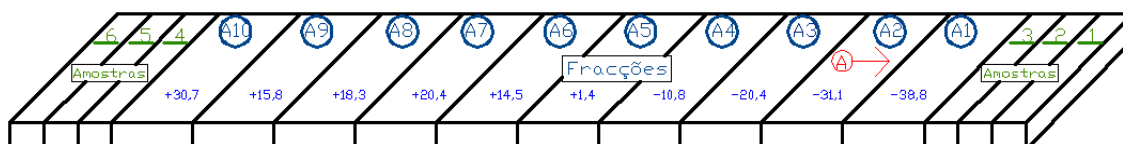


Figura 6-35: Localização das amostras e fracções na tábua 4 e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %

Conforme o observado no gráfico da humidade final, a amostra da extremidade mais perto do início do escoamento tem um valor inferior ao valor médio em 38,8%, aumentando em direcção ao centro da tábua, sendo que a extremidade oposta tem um valor de humidade superior ao valor médio em 30,7%, como se pode observar na Figura 6-35.

Nas figuras seguintes (Figura 6-36 – A e B, Figura 6-37 e Figura 6-38), podem-se observar os gráficos referentes às condições operatórias da experiência.

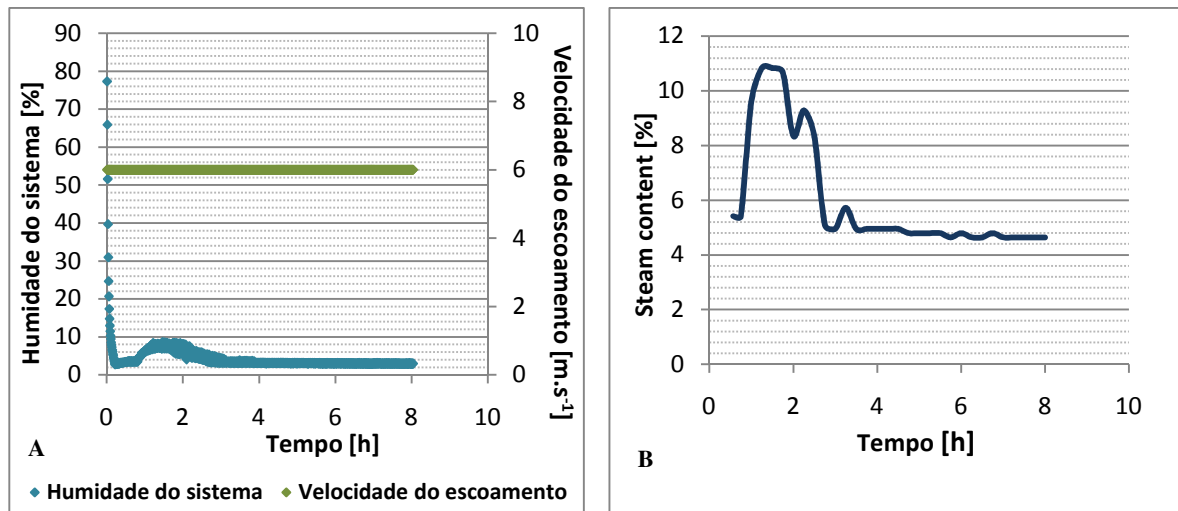


Figura 6-36: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 4; B – Evolução do *steam content* na experiência 4

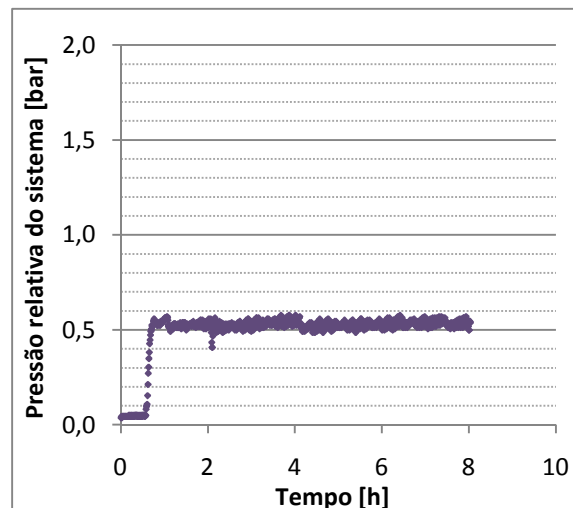


Figura 6-37: Evolução da pressão do sistema durante a experiência 4

Pelas análises dos gráficos, pode-se observar que:

- A velocidade de ventilação manteve-se constante nos 6 m.s⁻¹;
- Na fase de aquecimento, a humidade do sistema decresceu rapidamente, até atingir o valor próximo de zero;
- Após o sistema alcançar a temperatura de 135°C (temperatura pretendida para esta experiência) e começar a injeção de água, durante 1 segundo a cada 3 minutos, a humidade relativa aumentou um pouco até cerca de 8,5%, decrescendo em seguida até atingir valores próximos de zero, até ao final da experiência.

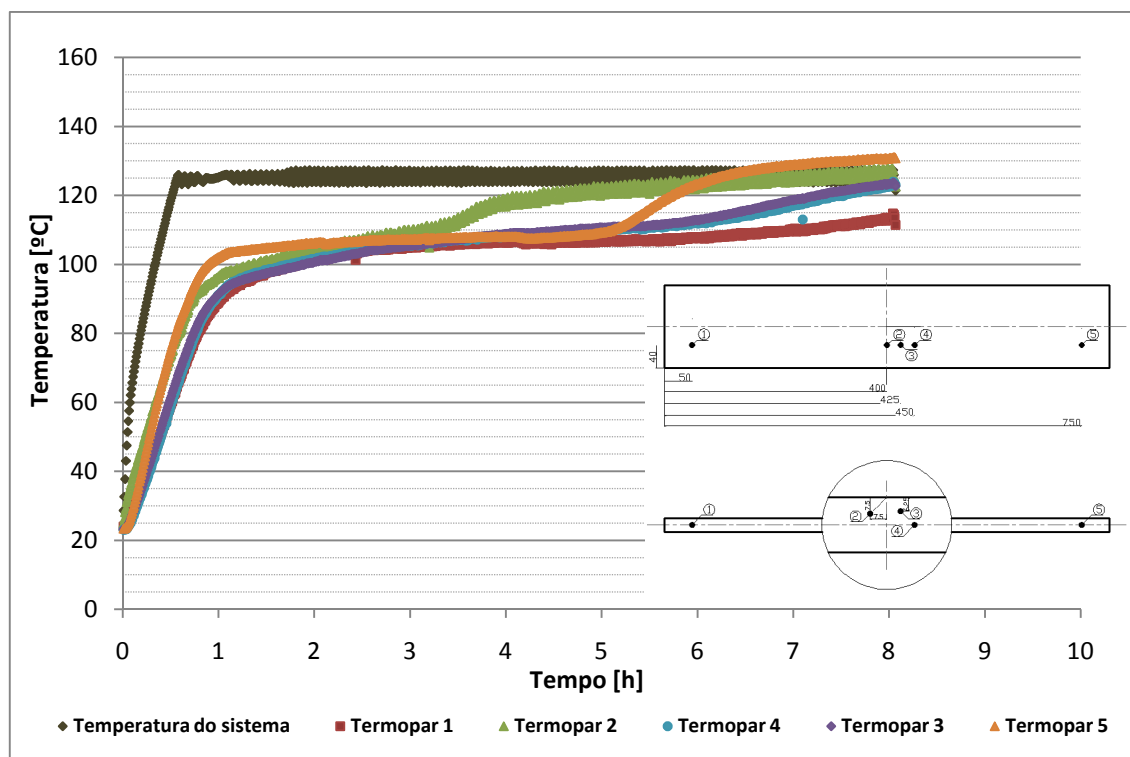


Figura 6-38: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 4

Este decréscimo é devido à adição de ar comprimido para as quantidades de água injectada de modo a obter-se a pressurização do sistema. Para tentar entender a razão pela qual a humidade relativa é baixa, tem que se perceber alguns pontos do funcionamento do sistema:

- Para se conseguir um sistema pressurizado, é necessário injectar água em quantidade suficiente, assim como injeção de ar comprimido na zona do veio do ventilador a pressões relativamente superiores à pressão de operação, para garantir que não haja fugas nesta zona;
- Existe uma válvula que abre quando a pressão dentro do sistema ultrapassa o valor pretendido, 1,5 bar (absoluto), neste caso.

No final foi a injeção de ar comprimido que acabou por pressurizar o sistema. Acontece que a válvula ao abrir, liberta quer ar que foi introduzido quer vapor de água, podendo provocar uma diminuição da humidade dentro do sistema. Esta situação seria colmatada com a injeção de maior quantidade de água no sistema. No entanto, as quantidades injectadas de água podem não ser suficientes para manter a humidade do sistema em valores superiores. Foi também verificado pelo operador que, ao abrir a tampa da estação de secagem no final da experiência, que a câmara encontrava-se seca, não se encontrando condensados de água. Nas experiências à

pressão de 2 bar foi introduzida maior quantidade de água para tentar aumentar a humidade do sistema e tentar resolver este problema.

- O *steam content* aumentou até aos 11% coincidindo com o aumento da humidade, decrescendo logo em seguida até 5%, valor onde se manteve até ao final da experiência.
- A pressão pretendida para esta experiência foi atingida cerca das 0,71 horas de funcionamento após se ter atingido a temperatura de 125°C e o sistema começar a injeção de água.

Analisando agora o comportamento das temperaturas, tem-se:

- Analisando globalmente as temperaturas, verifica-se que o plano horizontal, correspondente à temperatura de bolbo húmido, situa-se entre 105 e 110°C, sendo que o mesmo patamar nas experiências à pressão atmosférica situa-se nos 100°C. Isto é devido ao facto de, com o aumento da pressão, ser necessário fornecer mais calor para conseguir evaporar a água da tábua. Logo a 1,5 bar é necessário atingir uma temperatura superior para conseguir remover a humidade livre, como se pode verificar na Tabela 6-13 (extraído das Tabelas termodinâmicas de vapor saturado, no Anexo B):

Tabela 6-13: Temperatura de saturação em função da pressão

Pressão de operação (bar)	Temperatura de saturação (°C)
1,0	99,63
1,5	111,37
2,0	120,23

(Çengel & Boles, 2006)

- Na fase inicial, as temperaturas dos locais analisados acompanham o aquecimento do sistema até cerca da 1 hora de funcionamento. Após esta fase, as temperaturas estabilizam a temperaturas entre 105°C e 110°C. Este comportamento é quase simultâneo em todos os locais, com diferenças de alguns minutos.
- O local situado à superfície (L2) é o primeiro a atingir o PSF, cerca das 3 horas de funcionamento do sistema, acabando por, no final da experiência, alcançar a temperatura do sistema. Neste momento, o conteúdo médio de humidade da tábua é 42,5%. Este comportamento não se verificava nas experiências anteriores, pelo que poderá ser um efeito da pressão aplicada, ou então ter havido uma deslocação do termopar para o interior da madeira. As temperaturas dos restantes locais permanecem no valor da temperatura de bolbo húmido durante 2,5 horas, que corresponde a 30% do tempo total da experiência.

- A superfície da tábua é seguida pela extremidade próxima ao início do escoamento (L5), cerca das 5 horas, atingindo também a temperatura do sistema, no final da experiência.
- As temperaturas dos locais, L3 e L4, começam a aumentar quase em simultâneo, o que pode evidenciar um gradiente de humidade quase nulo. No final da experiência, as temperaturas destes locais aproximam-se à temperatura do sistema.
- Por fim, o último local a aumentar de temperatura é o L1, na extremidade oposta ao início do escoamento, não conseguindo, no entanto, atingir a temperatura do sistema. Novamente, isto pode ser devido à sua proximidade com o local de injeção de água e à distância ao início do escoamento.

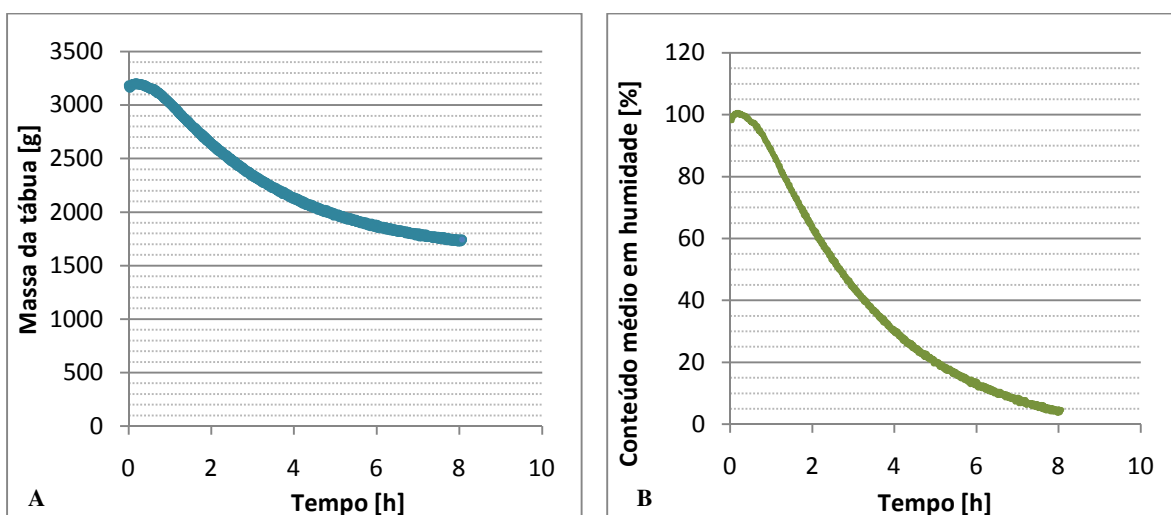


Figura 6-39: A – Massa da tábua 4; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 4

Observando a Figura 6-39 – A referente à evolução da massa da tábua, verifica-se que após os momentos iniciais, a massa da tábua diminui mais acentuadamente. Durante a experiência, a tábua perdeu cerca de 1443,4 g. O valor médio do conteúdo de humidade (Figura 6-39 – B) diminuiu desde o valor inicial de 99,5% para um valor final de 4,7% em cerca de 8,07 horas. A diminuição foi mais rápida durante as etapas iniciais passando depois a diminuir mais lentamente com o progresso da secagem.

Analisando agora a taxa de secagem (Figura 6-40 – A e B), durante o processo ocorrem duas grandes fases: a 1ª fase em que a taxa cresce rapidamente, com um declive mais acentuado, atingindo valores mais elevados quando o sistema atinge a temperatura pretendida, seguindo-se depois, uma fase decrescente.

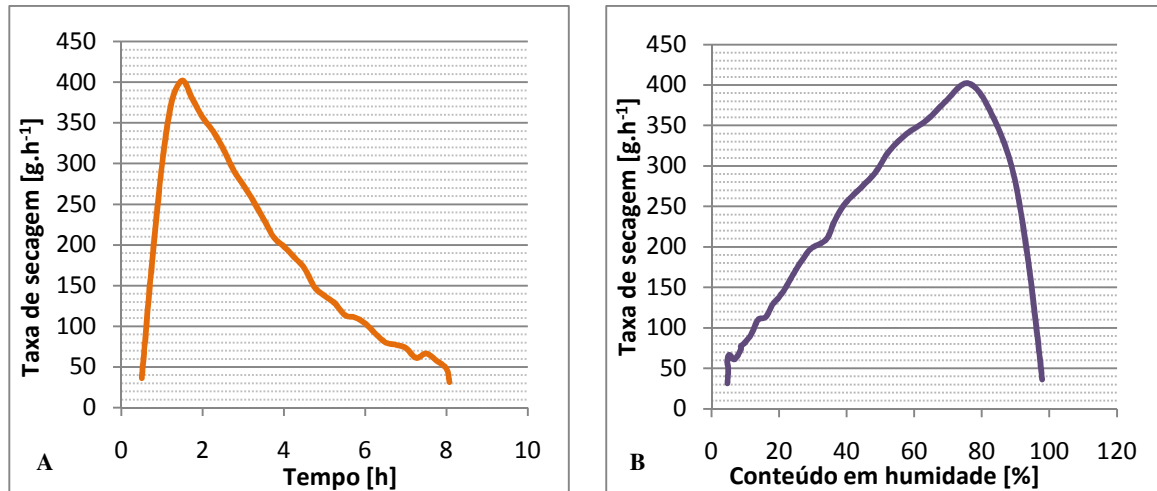


Figura 6-40: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade

O valor da taxa de secagem mais elevado observado é 402,23 g.h⁻¹. Devido ao rápido aumento da temperatura do sistema, não ocorre fase constante de taxa de secagem.

6.7 EXPERIÊNCIA 5

Tabela 6-14: Condições operatórias da experiência 5

Condições operatórias T = 135°C, velocidade = 10 m.s ⁻¹ , pressão absoluta = 1,5 bar
Tempo de injeção = 1 seg; intervalo de injeção = 180 seg; volume total de água injectada = 2,3 dm ³

Na Tabela 6-15 são apresentados os valores da caracterização dimensional.

Tabela 6-15: Caracterização dimensional da tábua 5 [mm]

Comprimento		Largura			Espessura					
a ₁	a ₂	b ₁	b ₂	b ₃	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆
<i>Antes de cortar as amostras da tábua</i>										
1000	999	152	153,5	152	24	25	27	27,5	28,5	28,5
<i>Depois de cortar as amostras da tábua</i>										
806	805	152	153,5	152	24	25	27	27,5	28,5	28,5
<i>Depois da secagem</i>										
801	804	149	149	146	23	23	26	26	27	27
Diferença em percentagem										
0,6	0,1	2,0	2,9	3,9	4,2	8,0	3,7	5,5	5,3	5,3

Após a secagem, verifica-se que todas as dimensões variaram principalmente a espessura e largura da tábua.

As figuras seguintes (Figura 6-41 – A e B) apresentam os valores de humidade inicial e final.

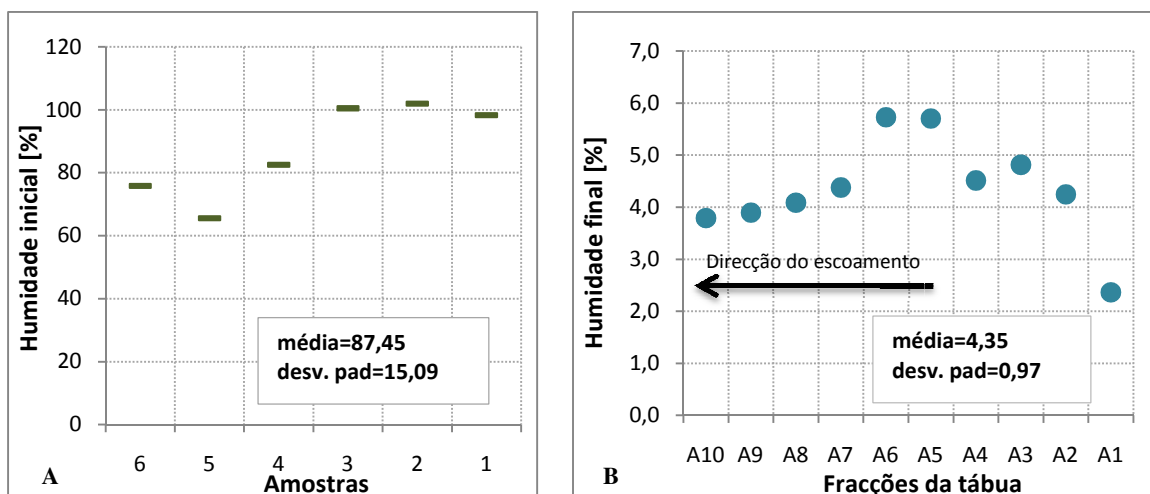


Figura 6-41: A – Humidade inicial da tábua 5; B – Humidade final da tábua 5

Ao observar o gráfico da humidade inicial, verifica-se que existe alguma dispersão de valores entre as extremidades e especialmente nas amostras da extremidade oposta ao início do escoamento, possivelmente devido a um rasgo no saco de protecção durante o armazenamento ou então às próprias características da madeira. Este facto poderá influenciar a remoção da humidade da zona em que se situa o termopar 1. Em relação à humidade final, verifica-se que a sua distribuição é bastante diferente do observado nas experiências anteriores com injeção de água. A fracção A1 é a que possui um valor de humidade final mais baixo, seguida pela extremidade oposta. As fracções centrais são as que possuem valores de humidade mais elevados.

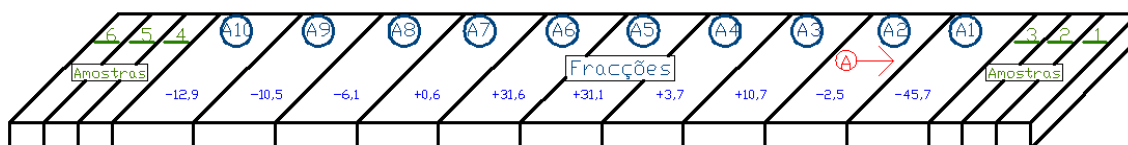


Figura 6-42: Localização das amostras e fracções na tábua 5 e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %

Conforme o observado no gráfico da humidade final, a amostra da extremidade mais perto do início do escoamento tem um valor inferior ao valor médio em 45,7% e a extremidade oposta tem um valor de humidade inferior ao valor médio em 12,9%. Os valores das fracções do centro a tábua mostram-se relativamente elevados face aos valores das extremidades, como se pode observar na Figura 6-42.

Nas figuras seguintes (Figura 6-43 – A e B, Figura 6-44 e Figura 6-45), podem-se observar os gráficos referentes às condições operatórias da experiência.

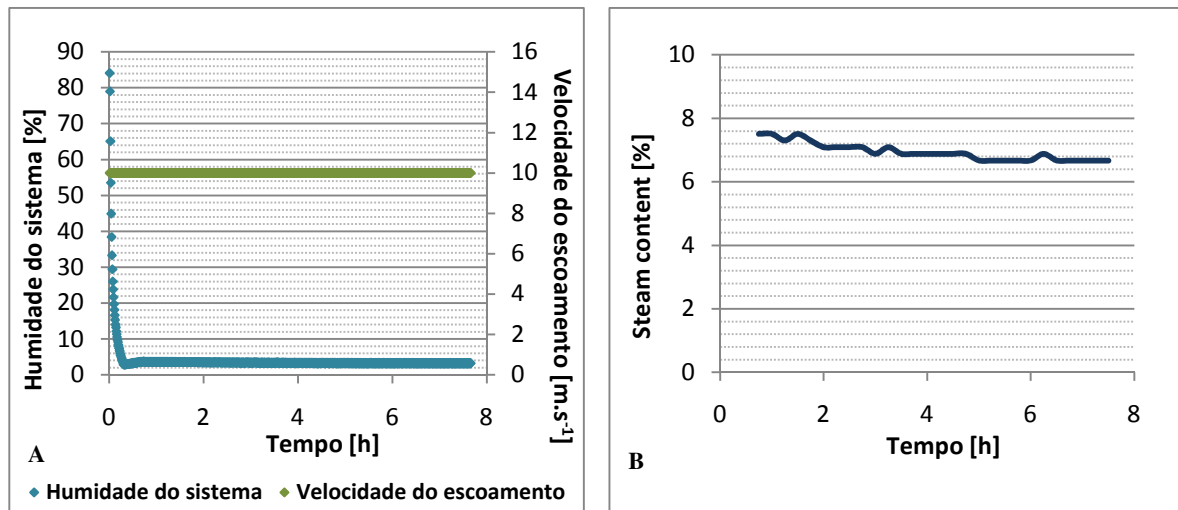


Figura 6-43: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 5; B – Evolução do *steam content* na experiência 5

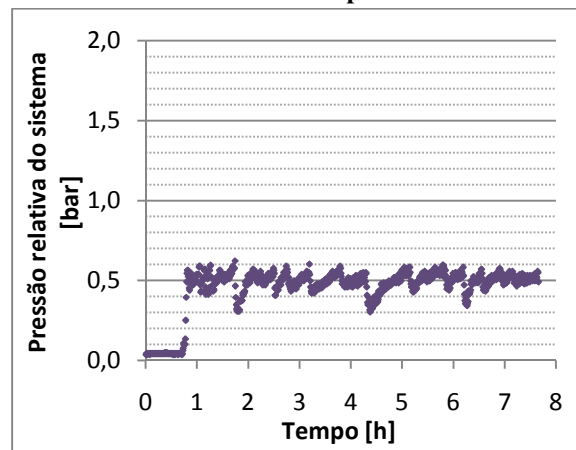


Figura 6-44: Evolução da pressão do sistema durante a experiência 5

Pela análise dos gráficos anteriores verifica-se:

- A velocidade de ventilação mantém-se constante nos 10 m.s⁻¹;
- Nos momentos iniciais, a humidade decresce rapidamente até valores próximos a zero, não conseguindo aumentar a humidade mesmo depois de começar a injeção de água. Aqui verifica-se igualmente a situação que ocorreu na experiência anterior.
- Durante toda a experiência o *steam content* decresce lentamente dos 7,5% até aos 6,5%.
- Verifica-se que o sistema atingiu a pressão pretendida cerca de 1 hora de funcionamento. Durante a experiência foram observados algumas oscilações de pressão. Estas oscilações de pressão vão provocar oscilações nas temperaturas medidas pelos termopares.

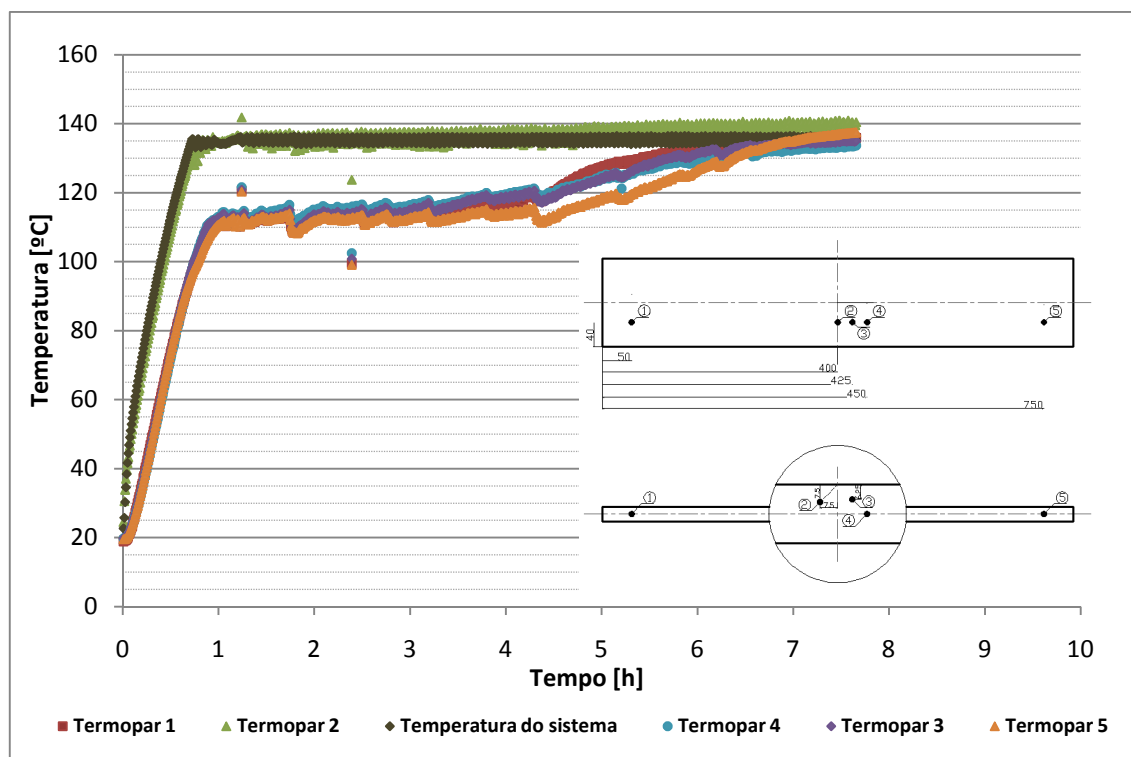


Figura 6-45: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 5

Nesta experiência verificou-se que a temperatura da superfície (L2) acompanhou o aquecimento do sistema, com valores muito próximos à temperatura do sistema. Poderá ter acontecido um deslocamento do termopar para o exterior da tábua, estando assim em contacto com o ar envolvente, registando a sua temperatura e não a temperatura da superfície da tábua.

As restantes temperaturas têm um comportamento muito similar umas às outras durante grande parte da experiência, ou seja, até cerca das 4,3 horas os termopares registaram os mesmos valores de temperatura, na gama 110%-116%. Ao fim das 4,3 horas, o conteúdo médio de humidade é cerca de 20,8%. A partir deste momento, observa-se:

- A temperatura do local L1, na extremidade mais distante do inicio do escoamento, começa a aumentar até atingir a temperatura do sistema. Este comportamento ainda não se tinha verificado em nenhuma experiência, uma vez que pelo facto de estar muito próximo da injeção de água e distante do inicio do escoamento, o local L1 era sempre o último a atingir o PSF. No entanto, como foi visto na análise da humidade inicial, este encontra-se na zona da extremidade com menor humidade inicial, o que pode ter influenciado a secagem desta área.

- Após o L1, o local L3 situado a 6,25 mm de profundidade e o local L4 situado no centro da tábua atingem o PSF, começando a sua temperatura a aumentar até se aproximar da temperatura do sistema.
- O último local a atingir o PSF é a extremidade mais próxima do início do escoamento (L5), acabando no final da experiência, por atingir uma temperatura superior à temperatura lida pelos termopares situados em L3 e em L4.

Durante toda a experiência observou-se várias oscilações de valores de temperatura adquiridas pelos termopares. Estas oscilações foram provocadas pela variação na pressão do sistema. Esta variável é controlada por uma válvula reguladora de pressão, e pode existir situações em que a pressão aumente ou diminua do valor pretendido que obriga o operador a reajustar a válvula manualmente de modo que se mantenha a pressão pretendida ao longo da experiência. Por esta razão é que nem sempre é possível obter um valor constante e igual á pressão pretendida. Isto pode-se verificar na Figura 6-46.

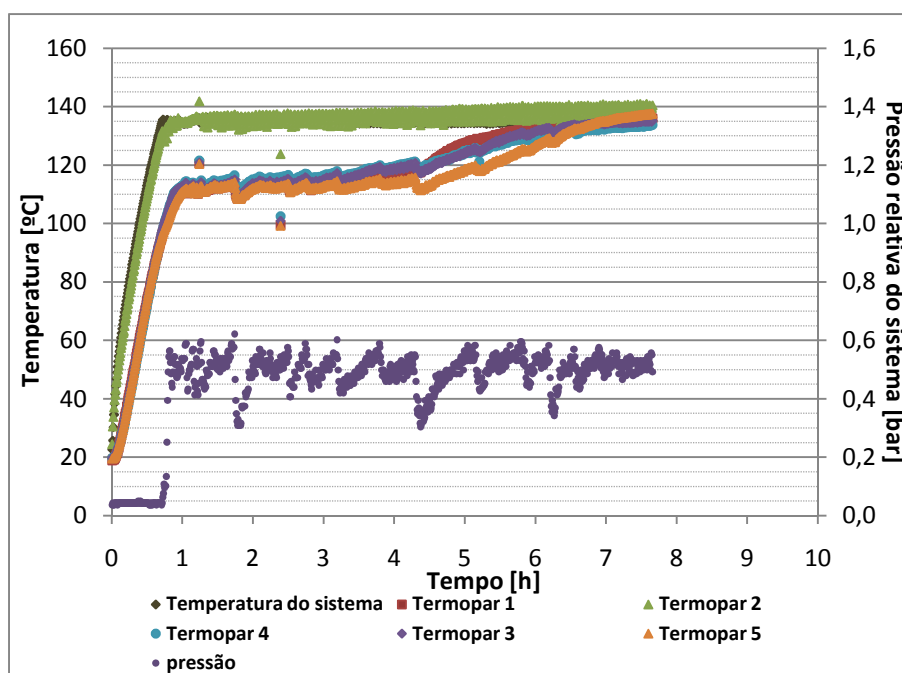


Figura 6-46: Influência da pressão na evolução das temperaturas do sistema e termopares localização dos termopares na madeira

Como exemplo, às 1,7 horas ocorreu uma oscilação de pressão para 0,3 bar. Como a temperatura de saturação a 0,3 bar é 107°C, a temperatura da madeira diminuiu para atingir esse valor, provocando assim a oscilação.

Relativamente à massa da tábua (Figura 6-47 – A), verifica-se que teve o mesmo comportamento das experiências anteriores, ou seja, diminuiu mais rapidamente durante a fase inicial e depois mais

lentamente até ao final da experiência. Durante toda a experiência a tábua perdeu cerca de 1228,5 g. Verifica-se que o comportamento do conteúdo de humidade (Figura 6-47 – B) é semelhante aos das experiências anteriores.

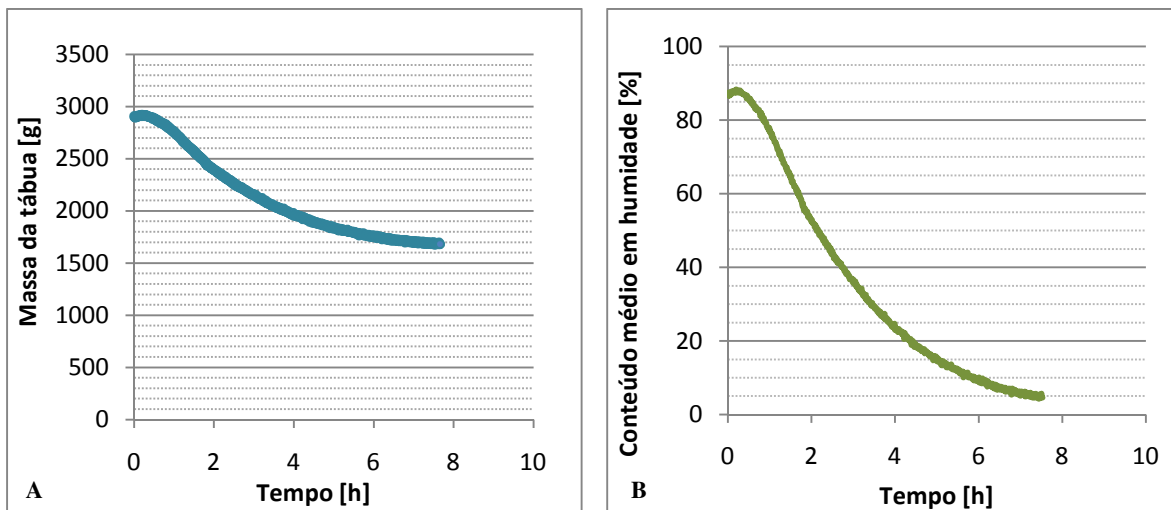


Figura 6-47: A – Massa da tábua 5; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 5

Os gráficos seguintes (Figura 6-48 – A e B) mostram a taxa de secagem, em função do tempo e do conteúdo de humidade.

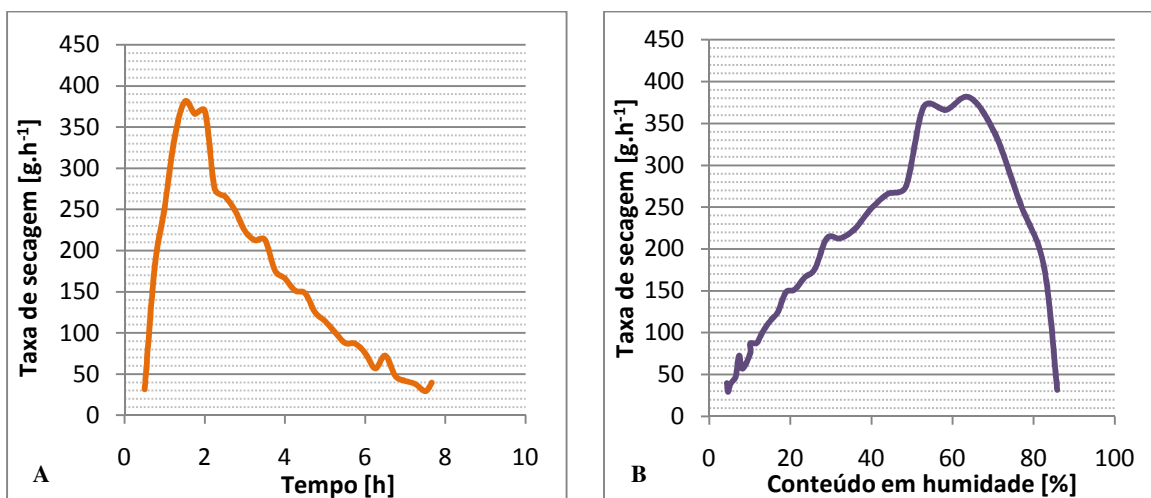


Figura 6-48: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade

Durante o processo ocorrem duas grandes fases: verifica-se uma 1ª fase em que a taxa cresce rapidamente, com um declive mais acentuado, atingindo valores mais elevados quando o sistema atinge a temperatura pretendida, seguindo-se depois, uma fase relativamente constante mas de curta duração, seguida de uma fase decrescente. Não era esperada a existência de uma fase de taxa de secagem constante, uma vez que o aquecimento do sistema é rápido. Contudo esta fase é de curta duração. Analisando em conjunto com o comportamento das temperaturas adquiridas pelos termopares, verifica-se que a fase constante corresponde a um pequeno intervalo em que todos os

loais, excepto o L2, apresentam exactamente os mesmos valores de temperatura. Isto mostra que a humidade livre está a ser removida em toda a tábua à mesma velocidade. O valor da taxa de secagem mais elevado observado é $381,08 \text{ g.h}^{-1}$, sendo que a partir desse valor, decresce até ao final do processo de secagem.

6.8 EXPERIÊNCIA 6*

Tabela 6-16: Condições operatórias da experiência 6*

Condições operatórias $T = 145^{\circ}\text{C}$, velocidade = 2 m.s^{-1} , pressão absoluta = 1,5 bar
Sem injeção de água

Esta experiência foi efectuada com as condições operatórias pretendidas, com a particularidade de não ter sido injectada água. Foi dado conta que a válvula de entrada de água estava fechada durante a experiência, mas decidiu-se continuar a experiência para observar o seu comportamento em tais condições.

Na Tabela 6-17 é apresentada a caracterização dimensional da tábua, durante as várias fases do processo.

Tabela 6-17: Caracterização dimensional da tábua 6* [mm]

Comprimento		Largura				Espessura				
a_1	a_2	b_1	b_2	b_3	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
<i>Antes de cortar as amostras da tábua</i>										
999	999	151	151	151	24	24	24	24	24	24
<i>Depois de cortar as amostras da tábua</i>										
803	803	151	151	151	24	24	24	24	24	24
<i>Depois da secagem</i>										
801	800	145	144	145	23	23	23	23	23	23
Diferença em percentagem										
0,2	0,4	4,0	4,6	4,0	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2

Após a secagem, verifica-se que todas as dimensões variaram principalmente a espessura e largura da tábua.

As figuras seguintes (Figura 6-49 – A e B) apresentam a humidade inicial e final calculadas.

Na humidade inicial não se verifica grande variabilidade de amostras, estando as duas extremidades com humidades iniciais relativamente semelhantes. Verifica-se que a humidade final da fracção A10 é bastante diferente do observado na maioria das experiências com injeção de água. As fracções da extremidade mais perto do início do escoamento são as que possuem valores mais baixos de humidade sendo que as fracções A7, A8 e A9 possuem um valor de humidade final mais elevada.

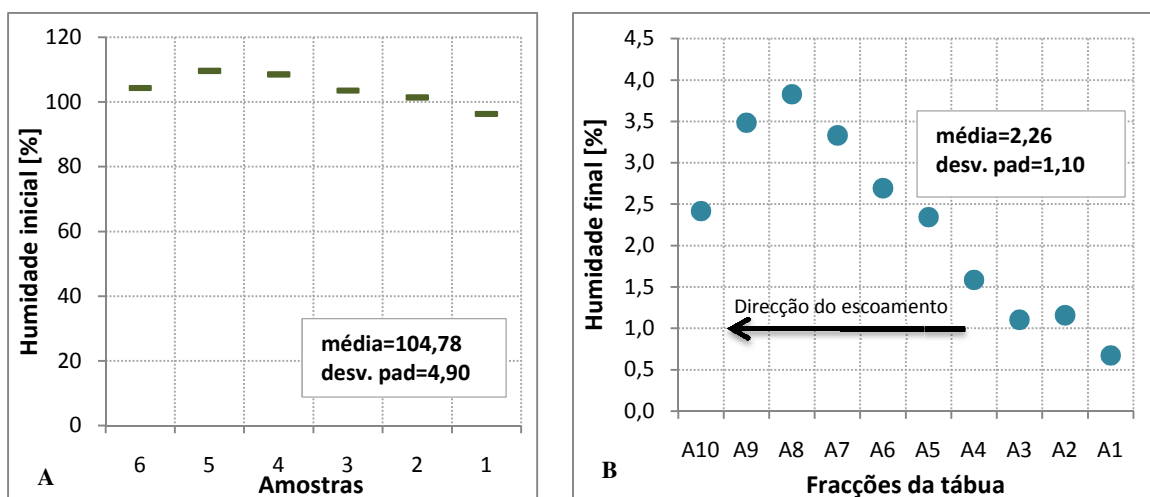


Figura 6-49: A – Humidade inicial da tábua 6*; B – Humidade final da tábua 6*

Conforme o observado no gráfico da humidade final, a amostra da extremidade mais perto do início do escoamento tem um valor inferior ao valor médio em 70,3%, enquanto que a fracção A8 tem um valor de humidade superior ao valor médio em 69,3%, como se pode observar na Figura 6-50.

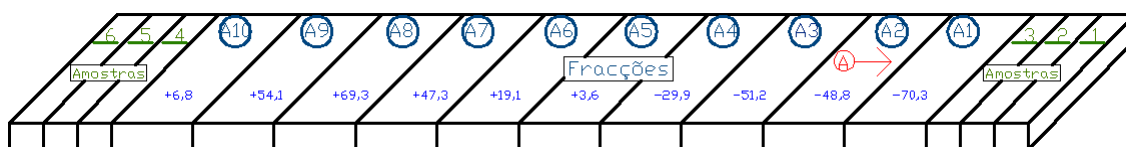


Figura 6-50: Localização das amostras e fracções na tábua 6* e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %

Nas figuras seguintes (Figura 6-51 – A e B, Figura 6-52, Figura 6-53), podem-se observar os gráficos referentes às condições operatórias da experiência.

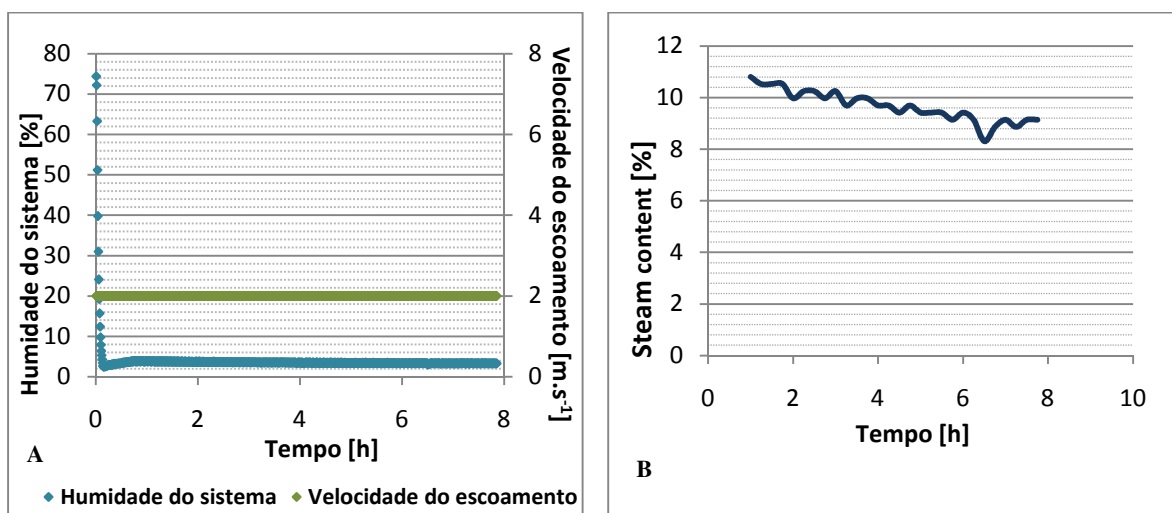


Figura 6-51: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 6*; B – Evolução do steam content na experiência 6*

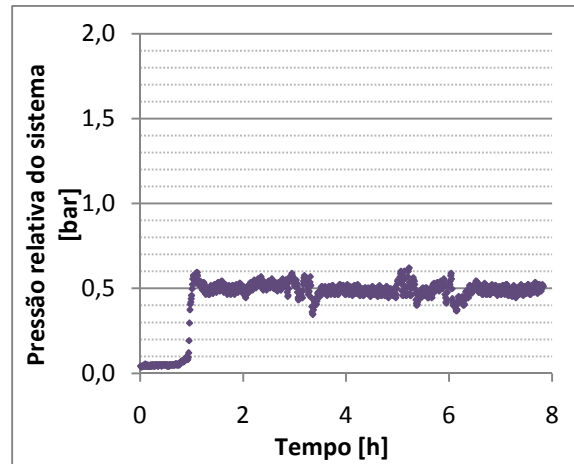


Figura 6-52: Evolução da pressão do sistema durante a experiência 6*

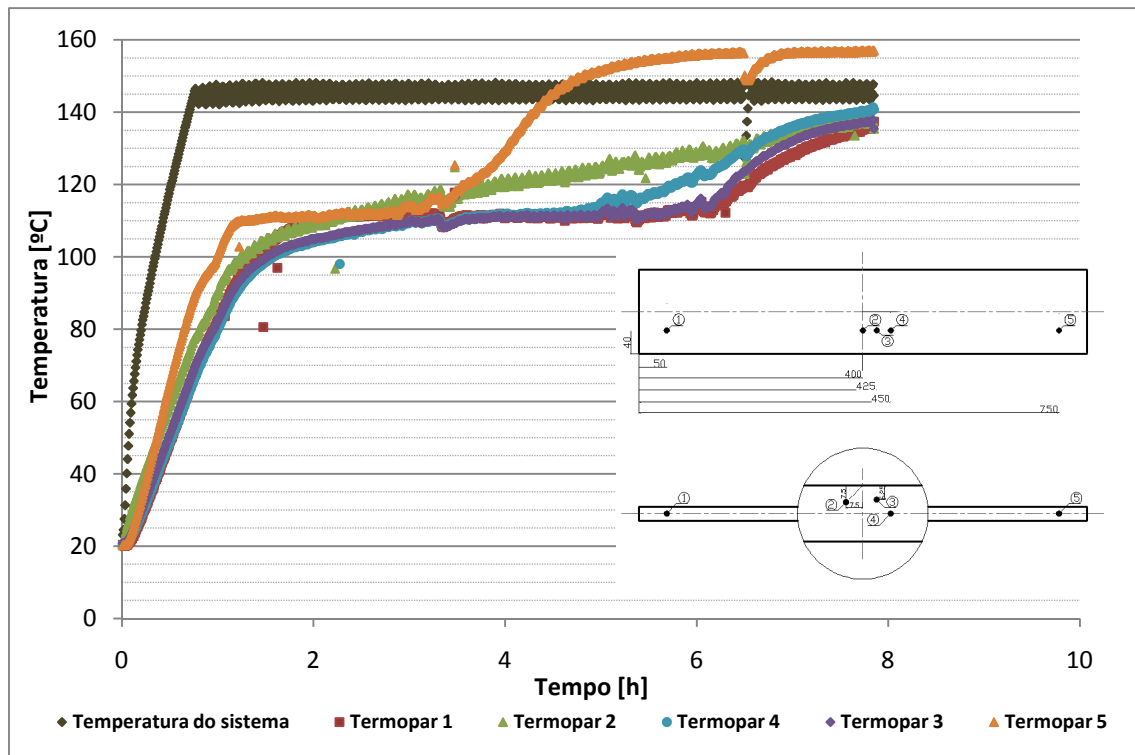


Figura 6-53: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 6*

Pela análise do gráfico, pode-se observar que:

- A velocidade de ventilação manteve-se constante nos 2 m.s^{-1} ;
- Na fase de aquecimento, a humidade do sistema decresceu rapidamente, até atingir o valor próximo de zero, mantendo-se constante até ao final da experiência.
- O *steam content* decresceu lentamente desde 10,8% até 9,2% durante a experiência.

- Verifica-se que o sistema ficou pressurizado após a 1ª hora de funcionamento, mantendo-se, com algumas oscilações, nos 0,5 bar (pressão relativa), sendo, no entanto, menores que na experiência anterior. Como nesta experiência não foi injectada água, a pressurização do sistema foi conseguida apenas com a injeção do ar comprimido e alguma humidade libertada da tábua.

Da análise do comportamento das temperaturas, observa-se que as temperaturas de todos os locais acompanham o aquecimento do sistema. A temperatura do L5, no início do escoamento é a primeira a alcançar o plano horizontal à temperatura de bolbo húmido cerca da 1,13 horas, permanecendo a 110°C durante 1,78 horas. Os termopares à superfície (L2) e na extremidade mais distante do início do escoamento (L1) adquirem a temperatura de bolbo húmido às 2,07 horas. Contudo, enquanto que a temperatura do local L1 permanece nesse patamar até às 6,09 horas, a temperatura do local L2 sobe quase instantaneamente até atingir uma temperatura próxima à temperatura de operação. Quanto aos locais L3 (a 6,25 mm de profundidade) e L4 (a 12,5 mm de profundidade, no centro da tábua), atingem a temperatura de bolbo húmido às 2,52 horas. O local L5 é o primeiro a atingir o PSF, às 2,97 horas, seguido L4, L3 e por fim o local L1. Curiosamente, o L4 atinge o PSF antes do L3, mesmo estando a maior profundidade na tábua, provavelmente devido à heterogeneidade da madeira e à existência de zonas secas. Quando o local L1 atinge o PSF, o conteúdo médio de humidade da tábua é 10,5%. Estes termopares adquirem temperaturas próximas à temperatura do sistema.

Às 6,52 horas verifica-se uma oscilação da temperatura do sistema e da temperatura do local L5 em virtude de se ter aberto a tampa para verificação da sua humidade do sistema. Durante a experiência, o gradiente de temperatura entre a superfície e o centro da tábua chega ao máximo de 10°C, o que é um valor um pouco menor comparado com a experiência a igual temperatura mas à pressão atmosférica.

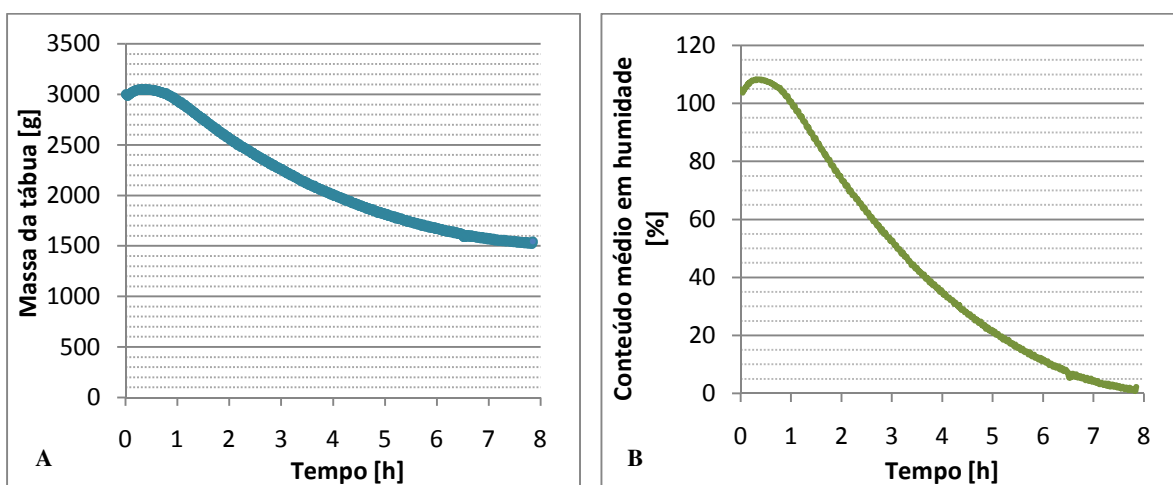


Figura 6-54: A – Massa da tábua 6*; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 6*

A evolução da massa da tábua (Figura 6-54 – A) mostra uma tendência semelhante às experiências anteriores. A tábua perdeu cerca de 1459,7g. O valor médio do conteúdo de humidade (Figura 6-54 – B) diminuiu desde o valor inicial de 104,8% para um valor final de 2,3% em cerca de 7,85 horas. A diminuição foi mais rápida durante as etapas iniciais passando depois a diminuir mais lentamente com o progresso da secagem.

As figuras seguintes (Figura 6-55 – A e B) apresentam os valores da taxa de secagem, em função do tempo e em função do conteúdo de humidade.

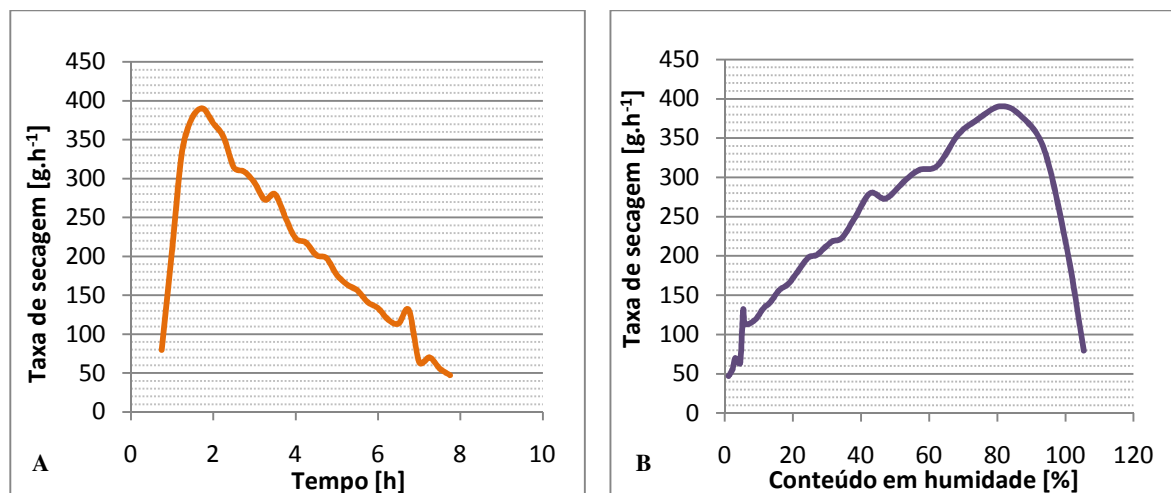


Figura 6-55: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade

Pela análise da taxa de secagem verifica-se que esta segue a mesma tendência das experiências anteriores apenas com uma diferença: observa-se que a taxa de secagem, depois de atingir o seu valor máximo, decresce progressivamente até ao final da experiência. O valor mais elevado observado é 390,25 g.h⁻¹.

6.9 EXPERIÊNCIA 6

Tabela 6-18: Condições operatórias da experiência 6

Condições operatórias T = 145°C, velocidade = 2 m.s ⁻¹ , pressão absoluta = 1,5 bar
Tempo de injeção = 1 seg; intervalo de injeção = 180 seg; volume total de água injectada = 2,6 dm ³

Esta experiência é a repetição da experiência anterior mas com injeção de água.

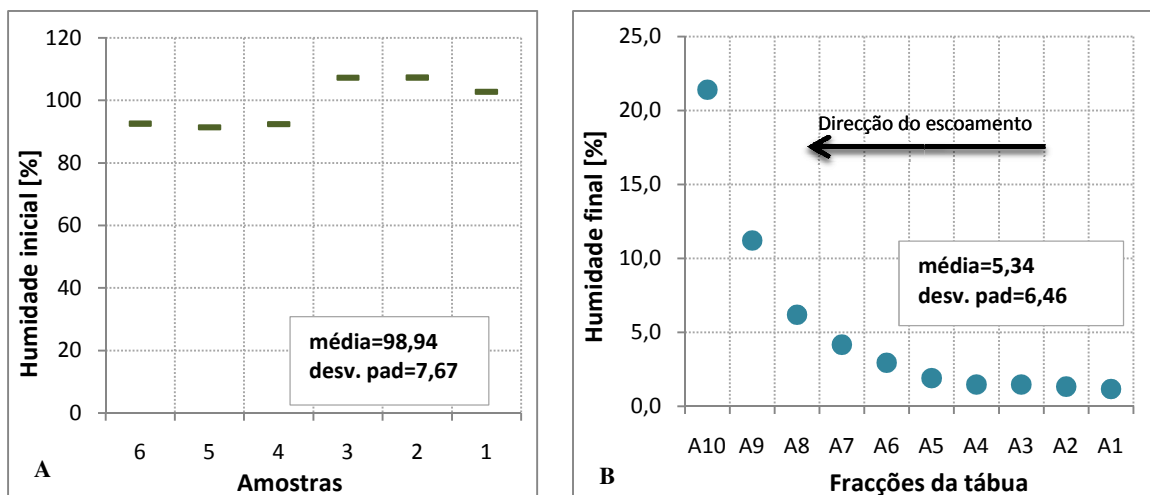
Na Tabela 6-19 é apresentada a caracterização dimensional da tábua, durante as várias fases do processo.

Tabela 6-19: Caracterização dimensional da tábua 6 [mm]

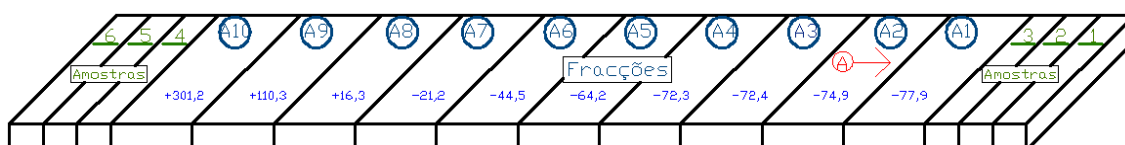
Comprimento		Largura			Espessura					
a ₁	a ₂	b ₁	b ₂	b ₃	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆
<i>Antes de cortar as amostras da tábua</i>										
1001	999	153	154	153	24	24	24	24	24	24
<i>Depois de cortar as amostras da tábua</i>										
799	800	150	148,5	147	23	23	23	23	22	22
<i>Depois da secagem</i>										
801	800	145	144	145	23	23	23	23	23	23
Diferença em percentagem										
0,7	0,5	2,0	3,6	3,9	4,2	4,2	4,2	4,2	8,3	8,3

Após a secagem, verifica-se que todas as dimensões variaram principalmente a espessura da parte central da tábua. Começa-se também a notar que a dimensão do comprimento alterou mais que nas outras experiências realizadas a esta pressão.

As figuras seguintes (Figura 6-56 – A e B) apresentam a humidade inicial e final calculadas.



Na análise da humidade inicial, observa-se que existe alguma diferença de valores entre as duas extremidades. Na análise da humidade final observa-se uma grande diferença entre a extremidade mais distante do início do escoamento e as restantes fracções da tábua. Este facto pode ser provocado pela distância ao início do escoamento, e pela proximidade do local de injeção de água. É de relembrar que na experiência anterior, em que não foi injectada água, este comportamento não se verificou, observando-se uma semelhança entre valores de humidade nas duas extremidades.



Na Figura 6-57 verifica-se que foi a fracção A1 que perdeu maior quantidade de humidade comparando com o valor médio, enquanto que a fracção A10 tem um valor de humidade de 301,2% superior ao valor médio. Todas as fracções da tábua, excepto a A9 e A10, perderam quantidades consideráveis de humidade face ao valor médio calculado.

Nas figuras seguintes (Figura 6-58 – A e B, Figura 6-59 e Figura 6-60), podem-se observar os gráficos referentes às condições operatórias da experiência.

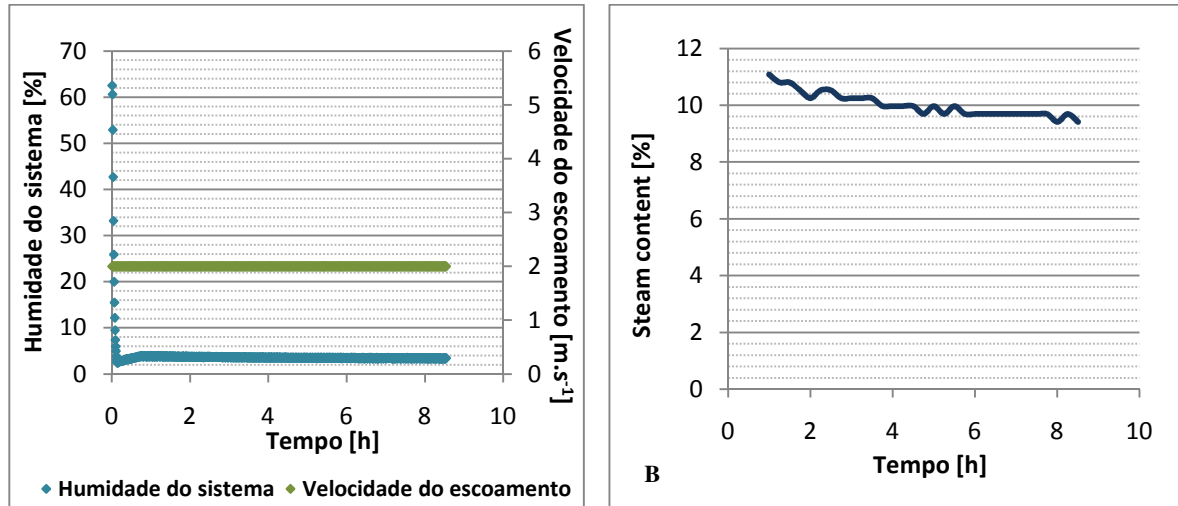


Figura 6-58: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 6; B – Evolução do *steam content* na experiência 6

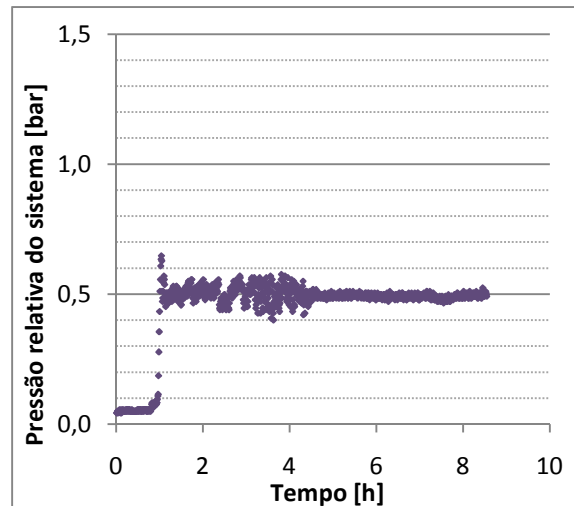


Figura 6-59: Evolução da pressão do sistema durante a experiência 6

Pela análise dos gráficos, pode-se observar que:

- A velocidade de ventilação manteve-se constante nos 2 m.s⁻¹;

- Na fase de aquecimento, a humidade do sistema decresceu rapidamente, até atingir o valor próximo de zero, mantendo-se constante até ao final da experiência. Nesta experiência, mesmo com a injeção de água, não se verificou aumento da humidade relativa, o que está de acordo com o que foi referido na experiência 4.

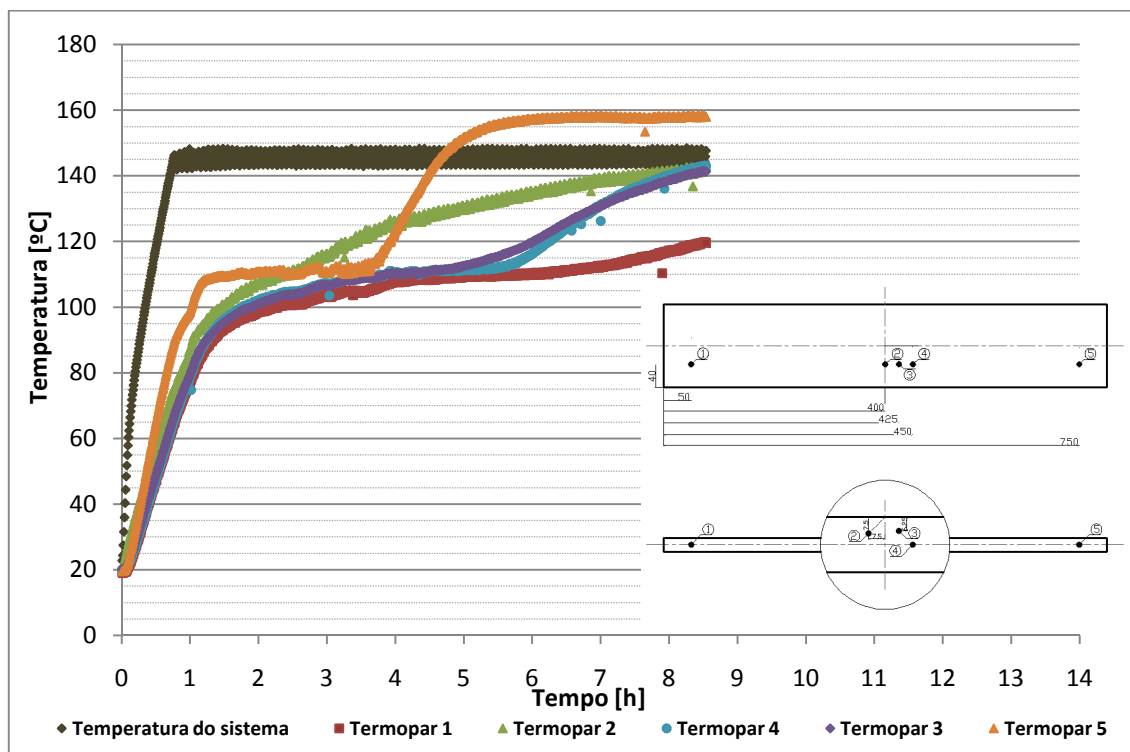


Figura 6-60: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 6

- O valor de *steam content* decresceu lentamente durante a experiência de 10,8% a 9,2%, semelhante ao que aconteceu na experiência anterior.
- Verifica-se que o sistema alcançou a pressão pretendida cerca de 1 hora de funcionamento. Observam-se algumas oscilações até à 4ª hora sendo que depois a pressão é mantida de forma mais constante.

O comportamento das temperaturas é muito semelhante à experiência anterior, apenas com algumas exceções:

- As temperaturas dos locais L3 (a 6,25 mm de profundidade) e L4 (a 12,5 mm de profundidade, no centro da tábua) têm comportamentos idênticos, atingindo o PSF ao mesmo tempo. Isto significa que, em zonas diferentes, atingiu-se o mesmo valor de humidade simultaneamente.

- O local no lado oposto ao início do escoamento (L1) atinge o PSF (cerca das 6,76 horas) mas não consegue alcançar a temperatura de operação até ao final da experiência. É de relembrar que a experiência anterior foi efectuada às mesmas condições com a diferença de não ter sido injectada água no sistema. Este facto vem provar, juntamente com a análise da humidade final, a influência da injeção de água no valor da humidade na zona do local L1.

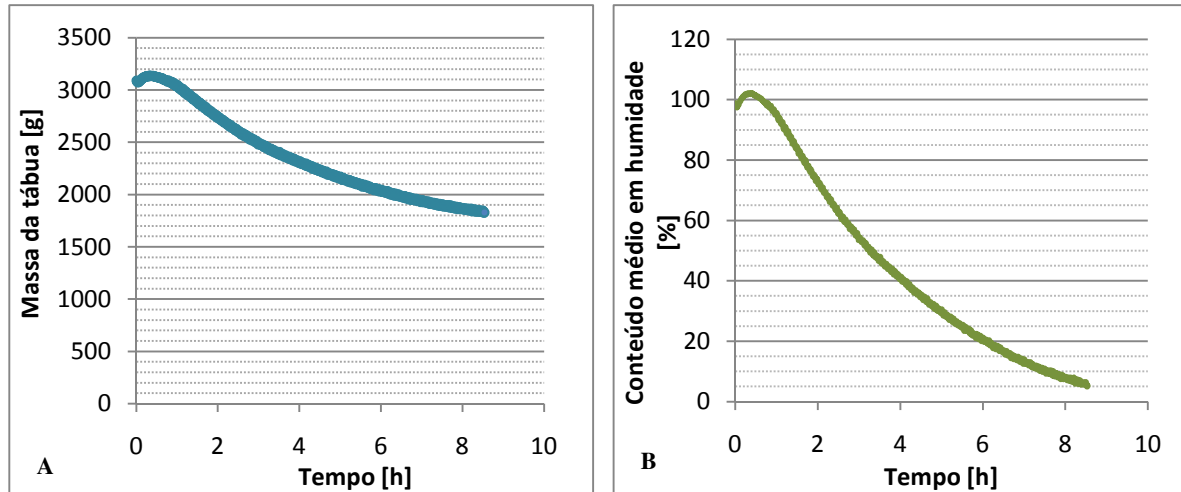


Figura 6-61: A – Massa da tábuia 6; B – Conteúdo médio de humidade da tábuia 6

Após os momentos iniciais, verifica-se que a massa da tábuia (Figura 6-61 – A) diminui mais acentuadamente, tendendo a estabilizar no final da experiência, atingindo massa constante. Durante a experiência, a tábuia perdeu cerca de 1261,0 g. Verifica-se, tal como nas experiências anteriores, que a evolução do conteúdo de humidade é muito semelhante (Figura 6-61 – B). O valor médio do conteúdo de humidade diminuiu desde o valor inicial de 98,9% para um valor final de 5,3% em cerca de 8,54 horas. Observa-se que a diminuição foi mais rápida durante a etapa inicial passando depois a diminuir mais lentamente com o progresso da secagem.

As figuras seguintes (Figura 6-62 – A e B) apresentam os valores da taxa de secagem, em função do tempo e em função do conteúdo de humidade.

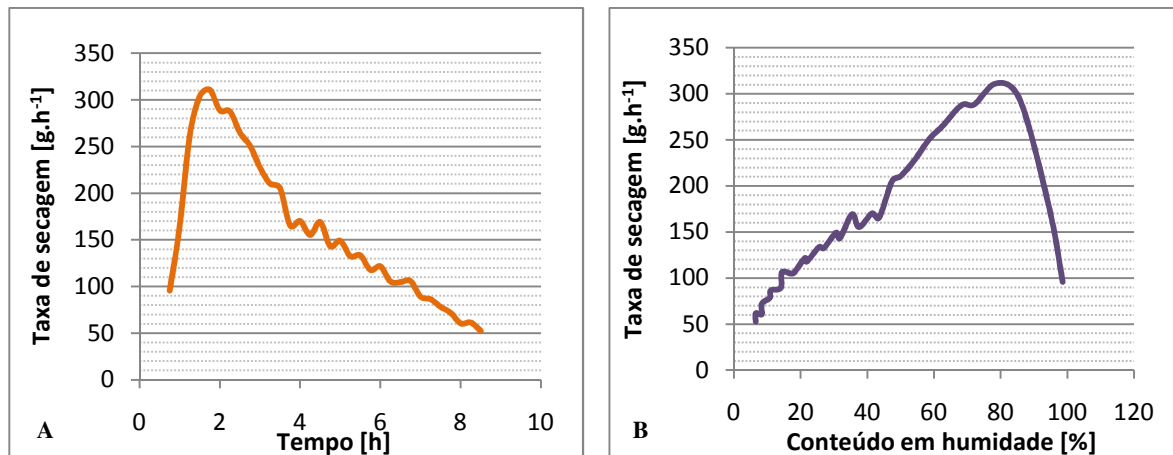


Figura 6-62: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade

Pela análise da taxa de secagem verifica-se que esta segue a mesma tendência da experiência anterior. O valor da taxa de secagem mais elevado observado é 310,83 g.h⁻¹.

6.10 EXPERIÊNCIA 7

Tabela 6-20: Condições operatórias da experiência 7

Condições operatórias T = 125°C, velocidade = 10 m.s ⁻¹ , pressão absoluta = 2 bar
Tempo de injeção = 3 seg; intervalo de injeção = 180 seg; volume total de água injectada = 7,6 dm ³

Na Tabela 6-21 é apresentada a caracterização dimensional da tábua, durante as várias fases do processo.

Tabela 6-21: Caracterização dimensional da tábua 7 [mm]

Comprimento		Largura			Espessura					
a ₁	a ₂	b ₁	b ₂	b ₃	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆
<i>Antes de cortar as amostras da tábua</i>										
1001	1002	150	151	151	24	24	24	24	25	25
<i>Depois de cortar as amostras da tábua</i>										
801	802	150	151	151	24	24	24	24	25	25
<i>Depois da secagem</i>										
799	800	147	147,5	146,5	23	23	22,5	23	23	23
Diferença em percentagem										
0,2	0,2	2,0	2,3	3,0	4,2	4,2	6,3	4,2	8,0	8,0

Após a secagem, verifica-se que todas as dimensões variaram principalmente a largura e espessura da tábua.

As figuras seguintes (Figura 6-63 – A e B) apresentam a humidade inicial e final calculadas.

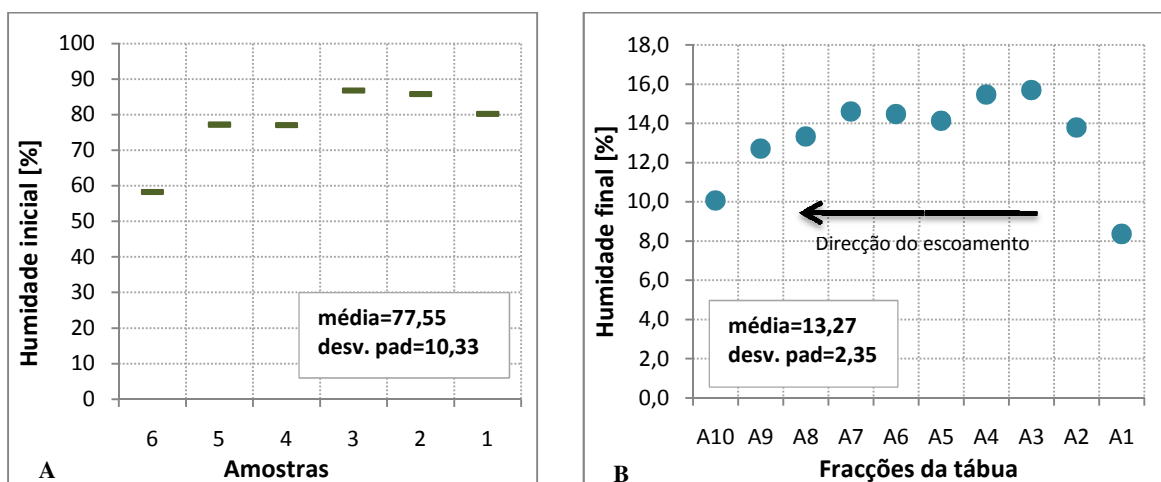


Figura 6-63: A – Humidade inicial da tábua 7; B – Humidade final da tábua 7

Verifica-se que, na humidade inicial, a amostra 6 tem valor mais baixo face aos outros valores. Este valor pode ter sido provocado por perda de alguma humidade que ocorreu durante o armazenamento ou ser uma característica própria da madeira. Na determinação da humidade final, observa-se algumas diferenças nos valores de humidade entre as extremidades, que têm menores valores, e a parte central da tábua, que possui valores mais elevados. Estes valores encontrados têm uma tendência diferente dos valores que foram determinados até agora nas experiências anteriores, onde, com a injeção de água, verificava-se valores de humidade final na zona da fracção A10 bastante elevados quando comparados com os valores das restantes fracções.

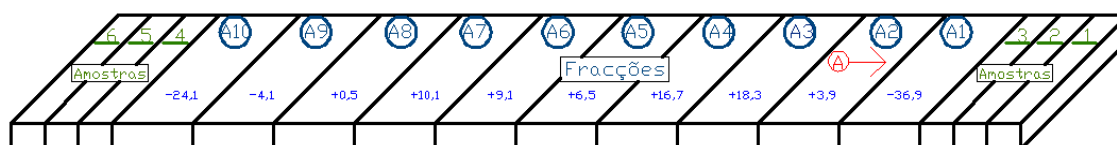


Figura 6-64: Localização das amostras e fracções na tábua 7 e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %

Verifica-se, tal como se observou no gráfico da humidade final, que foi a fracção A1 que perdeu maior quantidade de humidade comparando com o valor médio, enquanto que a fracção A3 tem um valor de humidade de 18,3% superior ao valor médio, como se pode verificar na Figura 6-64.

Nas figuras seguintes (Figura 6-65 – A e B, Figura 6-66, Figura 6-67), podem-se observar os gráficos referentes às condições operatórias da experiência.

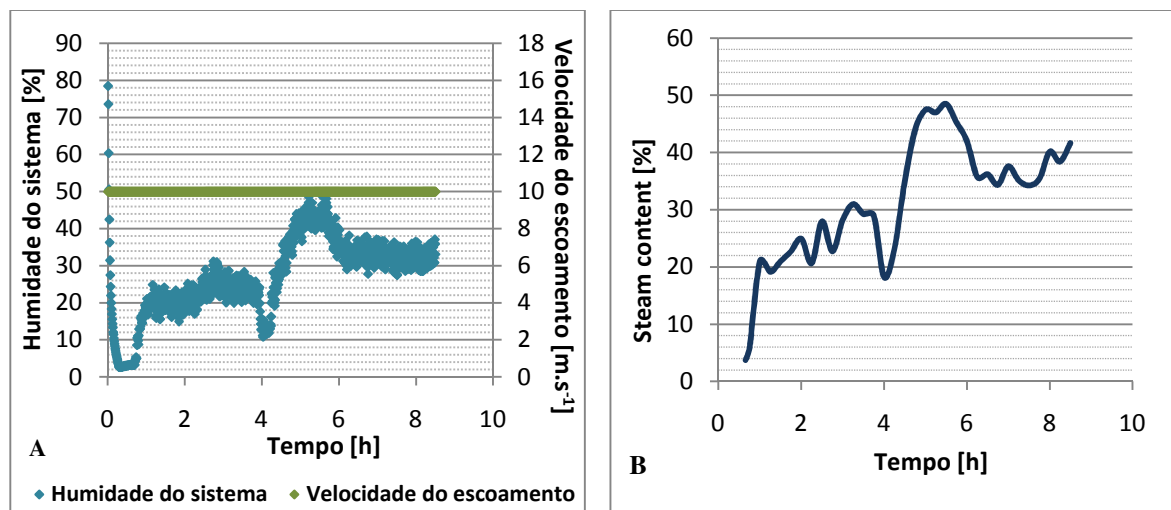


Figura 6-65: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 7; B – Evolução do steam content na experiência 7

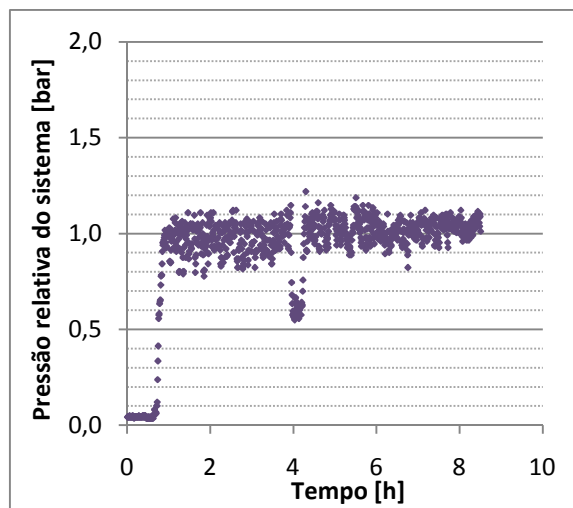


Figura 6-66: Evolução da pressão do sistema durante a experiência 7

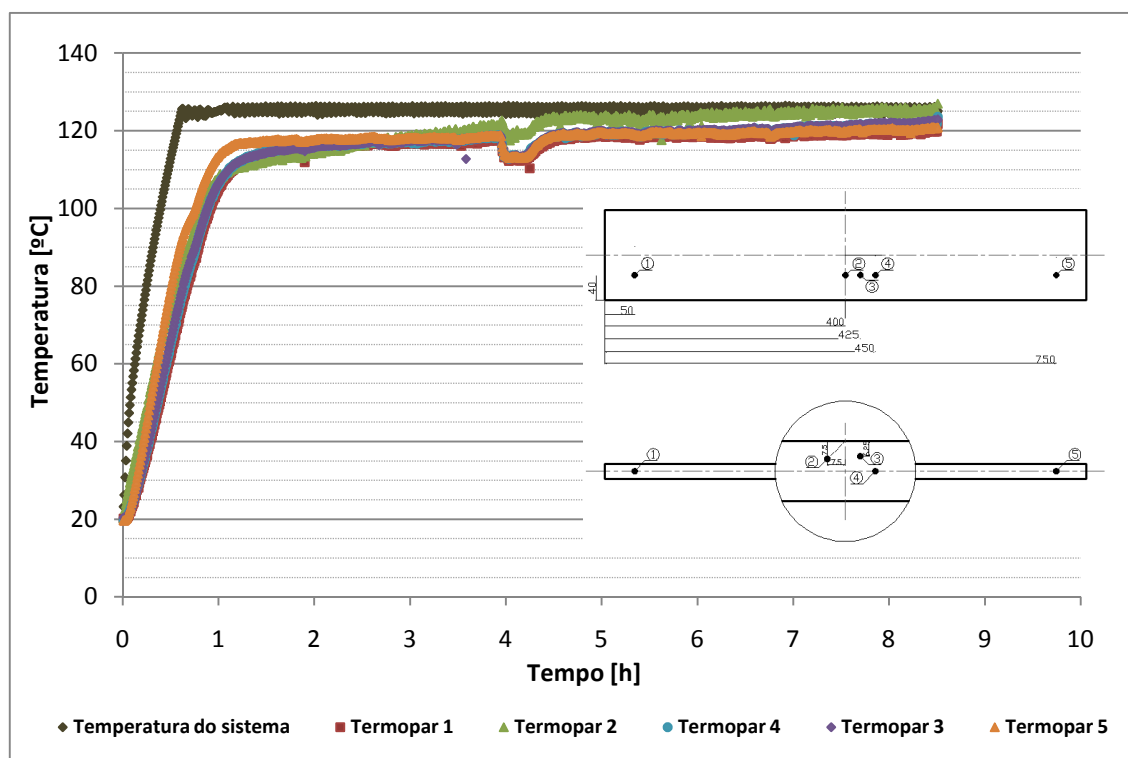


Figura 6-67: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 7

Pela análise dos gráficos anteriores observa-se que o sistema perdeu rapidamente a humidade que detinha inicialmente, devido ao aumento da temperatura dentro da câmara. A partir do momento em que se atingiu uma temperatura constante de 125°C, a humidade relativa manteve-se constante dentro de uma gama de valores, à volta dos 20% de humidade, até às 2,30 horas, aumentando um pouco para quase 30% até às 3,82 horas. Neste momento, ocorreu uma perda de pressão o que provocou uma diminuição na humidade relativa, sendo rapidamente recuperada. Após este

momento, a humidade relativa aumenta para valores superiores a 40%, mantendo-se depois constante entre 28% e 38% até ao final da experiência. Comparando com os valores de humidade obtidos das experiências anteriores, verifica-se que são bastante superiores, estando este facto possivelmente relacionado com a injeção de maior quantidade de água no sistema. Observa-se também que existe uma grande variabilidade de valores na humidade relativa, provocando também uma variabilidade de valores da pressão do sistema. Os valores observados de *steam content* seguem as tendências da humidade relativa aumentando de 4% para 42% até ao final da experiência.

Quanto à velocidade de escoamento, esta manteve-se constante nos 10 m.s^{-1} durante toda a experiência. Verificou-se, também, que a pressão pretendida foi atingida por volta da 1ª hora de funcionamento.

Quanto ao comportamento das temperaturas, inicialmente as temperaturas dos locais acompanham o aquecimento do sistema, atingindo um patamar horizontal simultaneamente. Durante toda a experiência os termopares registam a mesma temperatura excepto, a partir das 3 horas, que se verifica que a superfície (L2) tenta destacar-se das temperaturas registadas pelos restantes termopares acabando por atingir a temperatura de operação no final da experiência. Os restantes locais aumentam de temperatura lentamente até ao final da experiência. Observa-se que no final da experiência o conteúdo médio de humidade da tábua é de 13,3%, o que se situa abaixo do PSF. É provável que o comportamento das temperaturas dos diversos locais nesta experiência seja provocado pela proximidade da temperatura de bolbo seco à temperatura de bolbo húmido que, tendo apenas uma diferença de 5°C não permite ao sistema observar uma zona definida quando atinge o PSF. Esta diferença, não permite que até o sistema atingir o PSF, remova mais quantidade de humidade, justificando assim, os elevados valores de humidade final obtidos e a sua distribuição.

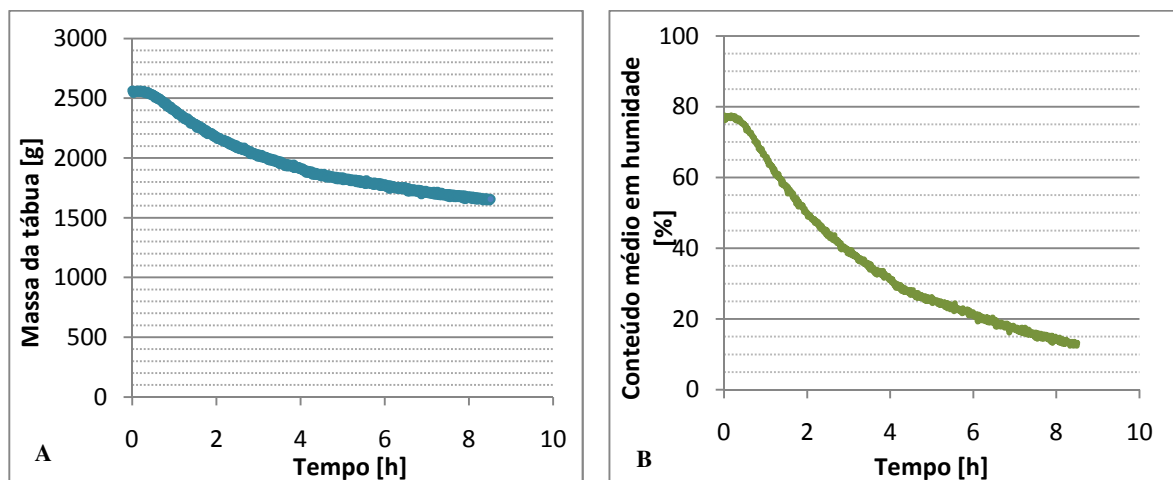


Figura 6-68: A – Massa da tábua 7; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 7

Após os momentos iniciais, verifica-se uma fase decrescente da massa (Figura 6-68 – A), mas ao contrário do que se tem observado nas outras experiências, esse decréscimo é muito mais constante, não se conseguindo diferenciar duas fases distintas. Durante a experiência, a tábua perdeu cerca de 908,3g. O valor médio do conteúdo de humidade (Figura 6-68 – B) diminuiu desde o valor inicial de 77,5% para um valor final de 13,3% em cerca de 8,51 horas. A diminuição foi mais rápida durante a etapa inicial passando depois a diminuir mais lentamente com o progresso da secagem.

As figuras seguintes (Figura 6-69 – A e B) apresentam os valores da taxa de secagem, em função do tempo e em função do conteúdo de humidade.

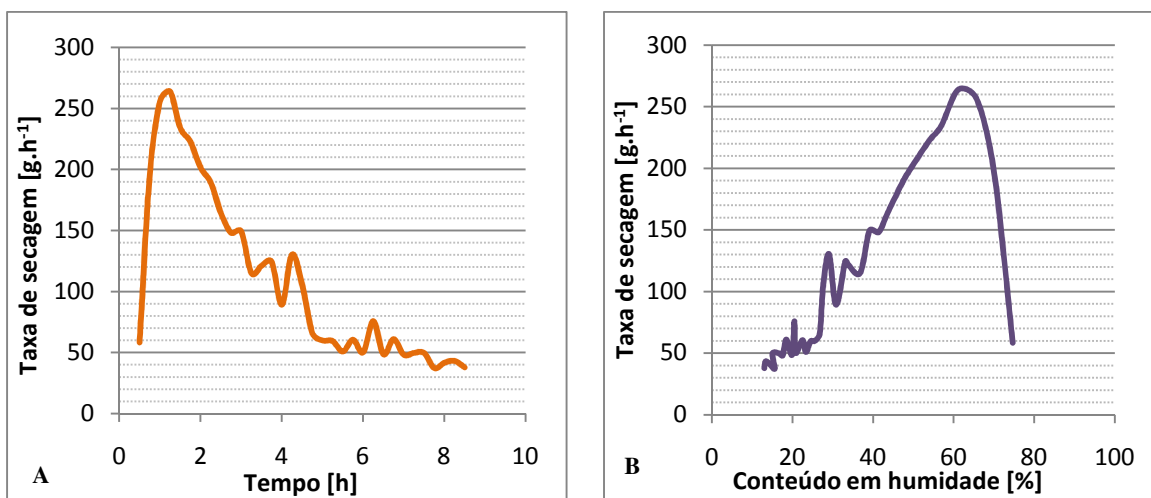


Figura 6-69: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade

Ignorando as oscilações, fruto do cálculo com médias, ao observar o gráfico da taxa de secagem verifica-se que a fase decrescente tem uma tendência mais rápida até às 5 horas de funcionamento (quando atingem temperaturas muito próximas da temperatura do sistema), passando depois a ter uma tendência mais lenta. Isto pode evidenciar, tal como foi referido antes, que para atingir valores mais baixos de humidade, seria preciso muito mais tempo, uma vez que a taxa de secagem evolui mais lentamente. A taxa de secagem mais lenta verifica-se a partir de 30% de conteúdo em humidade (PSF). O valor máximo da taxa de secagem obtido é 263,83 g.h⁻¹.

6.11 EXPERIÊNCIA 8

Tabela 6-22: Condições operatórias da experiência 8

Condições operatórias T = 135°C, velocidade = 2 m.s ⁻¹ , pressão absoluta = 2 bar
Tempo de injeção = 3 seg; intervalo de injeção = 180 seg; volume total de água injectada = 9,3 dm ³

Esta experiência foi das mais problemáticas, devido a vários problemas técnicos que ocorreram (fuga no vedante do ventilador e não se conseguia manter a pressão dentro da estação).

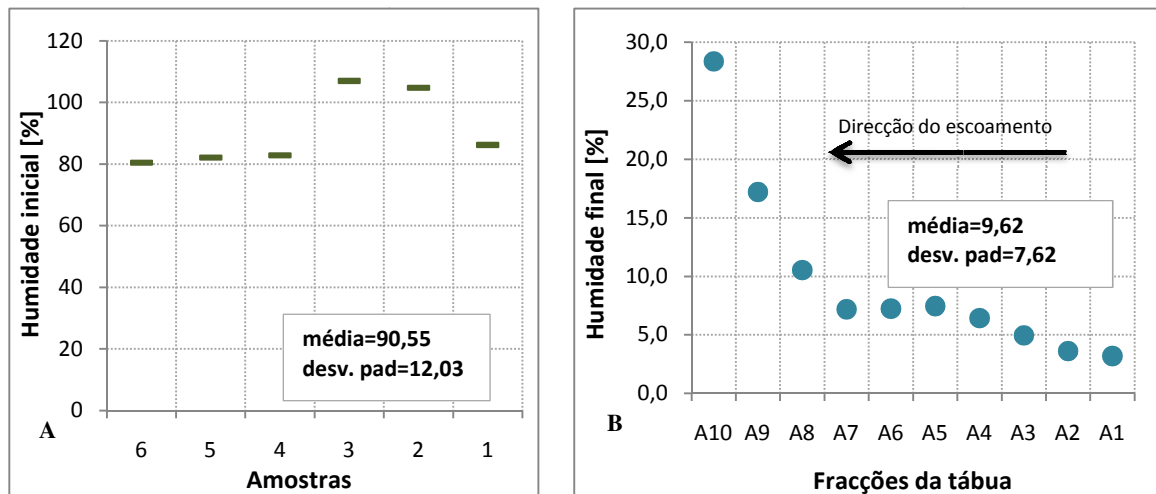
Na Tabela 6-23 é apresentada a caracterização dimensional da tábua, durante as várias fases do processo.

Tabela 6-23: Caracterização dimensional da tábua 8 [mm]

Comprimento		Largura			Espessura					
a ₁	a ₂	b ₁	b ₂	b ₃	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆
<i>Antes de cortar as amostras da tábua</i>										
999	1000	151,5	154	152	26	26	26,5	26,5	24	24
<i>Depois de cortar as amostras da tábua</i>										
807	808	151,5	154	152	26	26	26,5	26,5	24	24
<i>Depois da secagem</i>										
804	805	148	148,5	147	24,5	25	25	25	23	23
Diferença em percentagem										
0,4	0,4	2,3	3,6	3,3	5,8	3,8	5,7	5,7	4,2	4,2

Após a secagem, verifica-se que todas as dimensões variaram principalmente a espessura e largura da tábua.

As figuras seguintes (Figura 6-70 – A e B) apresentam a humidade inicial e final calculadas.



Na determinação da humidade inicial da tábua observou-se que existia grande heterogeneidade quer entre os valores de humidade da extremidade da tábua colocada perto do início do escoamento, quer entre as duas extremidades. Já na determinação da humidade final da tábua, verifica-se uma grande diferença entre a extremidade mais distante do início do escoamento e as restantes fracções da tábua. Este facto foi provocado pela proximidade do local de injeção de água e como esta experiência ocorreu com alguns percalços e foi parada várias vezes durante o processo, implicou a existência de alguma água no estado líquido no fundo da estação de secagem, podendo transferir humidade para a fracção mais próxima deste local.

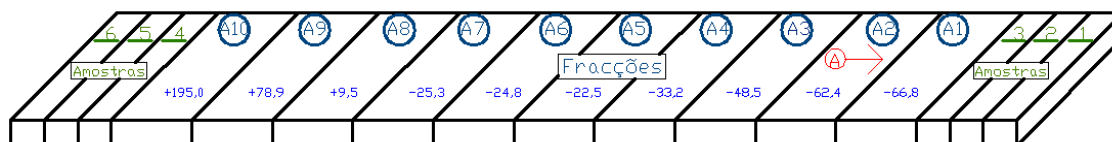


Figura 6-71: Localização das amostras e frações na tábua 8 e comparação com o valor médio de humidade final obtido, em %

Verifica-se que foi a fracção A1 que perdeu maior quantidade de humidade comparando com o valor médio, enquanto que a fracção A10 tem um valor de humidade de 195,7% superior ao valor médio (Figura 6-71). Todas as fracções da tábua, excepto a A9 e A10, perderam quantidades consideráveis de humidade face ao valor médio calculado.

Nas figuras seguintes (Figura 6-72 – A e B, Figura 6-73 e Figura 6-74), pode-se observar o gráfico referente às condições operatórias da experiência.

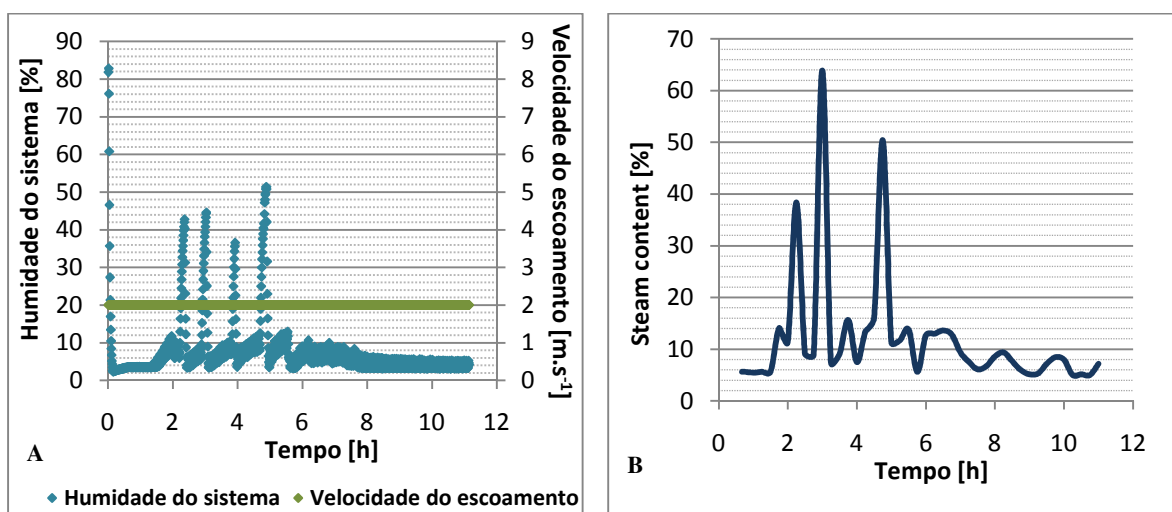


Figura 6-72: A – Evolução da humidade e velocidade do escoamento na experiência 8; B – Evolução do steam content na experiência 8

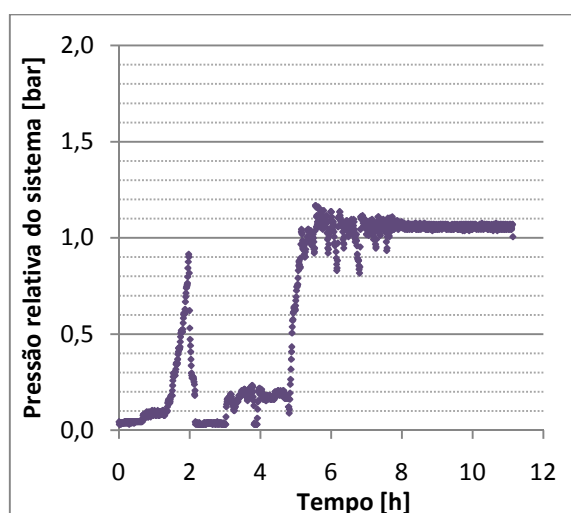


Figura 6-73: Evolução da pressão do sistema durante a experiência 8

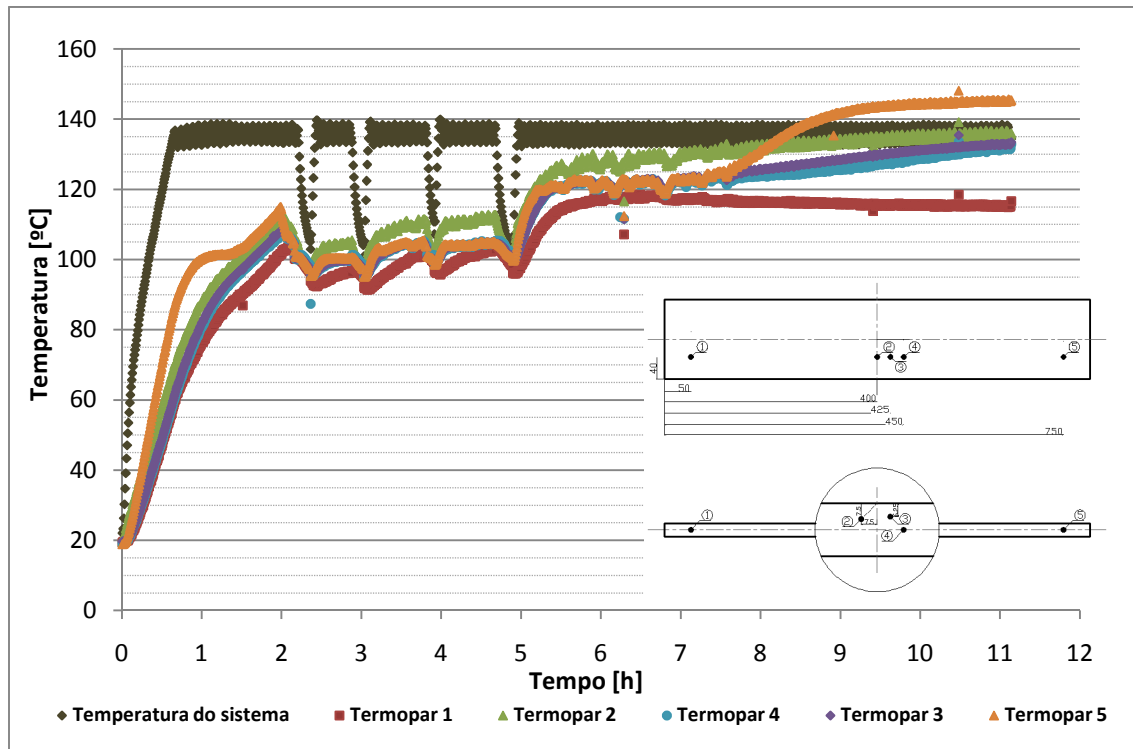


Figura 6-74: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 8

Verifica-se que esta é uma experiência claramente afectada pelas oscilações de pressão dentro do sistema de secagem. Na fase de aquecimento, a humidade do sistema decresceu rapidamente, até atingir o valor próximo de zero. Após o sistema atingir os 135°C, observa-se uma subida no valor da humidade relativa do sistema, afectando do mesmo modo o *steam content*, seguida de uma série de oscilações provocadas, como já referido, pelos problemas de fuga do vedante do ventilador, pelo que, só a partir das 5 horas de funcionamento é que o processo de secagem estabilizou. Assim, só irá ser efectuada uma análise da secagem a partir deste momento.

Se observar o gráfico da pressão, no período das 5,00 horas até às 7,53 horas os valores da pressão têm maior variabilidade que no período das 7,53 horas até ao final da experiência. Isto coincide com a diminuição da humidade relativa do sistema, como se pode observar na Figura 6-75. Ora isto pode significar que a humidade relativa no sistema tem grande influência na pressão. Como nesta experiência, houve uma dificuldade em colocar a estação pressurizada, optou-se por regular a válvula de injeção de ar para valores muito superiores aos valores utilizados, para assim poder alcançar a pressurização da câmara no valor desejado. Das 5,00 horas até às 7,53 horas, mesmo com a injeção de grandes quantidades de ar comprimido, ainda se verifica alguma variabilidade de valores de humidade relativa entre os 5% e os 10%, influência da água que foi injectada nas horas anteriores e que permaneceu na câmara. A partir das 7,53 horas já se começa a verificar a

influência do ar comprimido na humidade do sistema, baixando-a e provocando uma menor variabilidade nos valores de pressão.

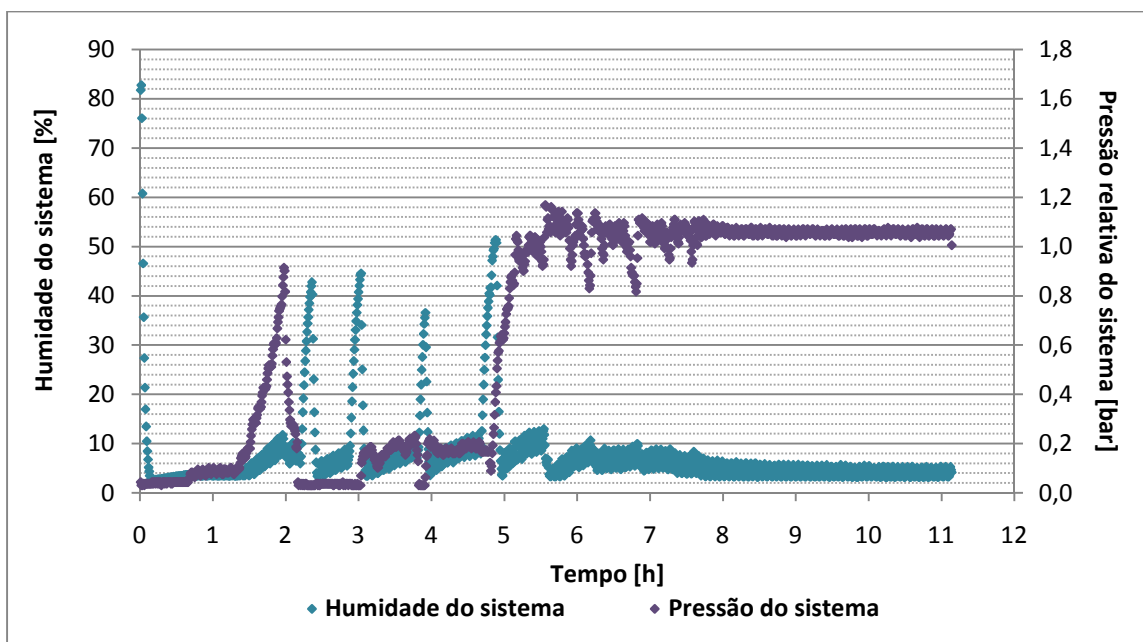


Figura 6-75: Relação entre a pressão do sistema e humidade relativa

A velocidade de ventilação manteve-se constante nos 2 m.s^{-1} .

Na análise ao comportamento das temperaturas observa-se:

- O termopar colocado à superfície da tábua (L2) é o que regista às 5,00 horas a temperatura mais elevada, continuando a aumentar lentamente até atingir a temperatura de operação no final da experiência.
- O local L1, no extremo oposto ao início do escoamento mantém a temperatura constante, em 115°C até ao final da experiência, não se observando nenhuma mudança de temperatura que indique a passagem do PSF.
- Os restante locais mantêm temperaturas constantes até cerca das 7,57 horas, altura em que o termopar na extremidade mais perto do início do escoamento (L5) regista um aumento de temperatura, atingindo, no final da experiência, a temperatura de operação. O termopar a 6,25 mm de profundidade (L3) e o termopar a 12,5 mm de profundidade, no centro da tábua (L4) registam temperaturas semelhantes até ao final da experiência, aumentando desde 120°C até á temperatura do sistema.

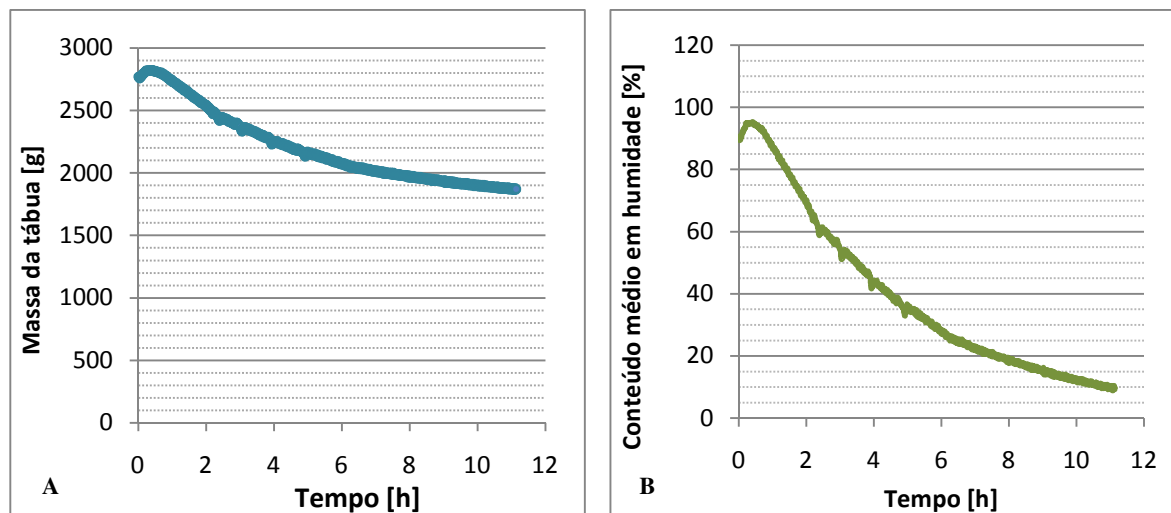


Figura 6-76: A – Massa da tábua 8; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 8

Após os momentos iniciais, verifica-se que a massa da tábua (Figura 6-76 – A) diminui mais acentuadamente, tendendo a estabilizar no final da experiência, atingindo massa constante. Durante a experiência, a tábua perdeu cerca de 900,1 g. O valor médio do conteúdo de humidade (Figura 6-76 – B) diminuiu desde o valor inicial de 90,2% para um valor final de 9,6% em cerca de 10 horas. A diminuição foi mais rápida durante a etapa inicial passando depois a diminuir mais lentamente com o progresso da secagem.

As figuras seguintes (Figura 6-77 – A e B) apresentam os valores da taxa de secagem, em função do tempo e em função do conteúdo de humidade.

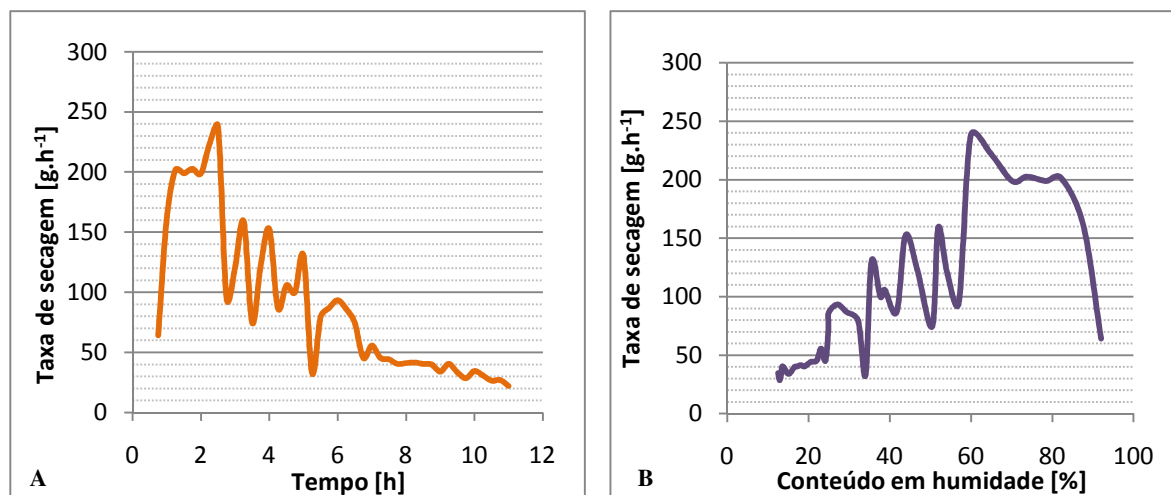


Figura 6-77: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade

Nesta experiência, os problemas técnicos que ocorrem influenciaram grandemente a taxa de secagem. Contudo, ignorando as oscilações provocadas pelas paragens da máquina, verifica-se que a tendência mantém-se, ou seja, começa com uma fase crescente, muito rápida, até atingir o pico máximo (237,91 g.h⁻¹), a partir do qual começa a decrescer até ao final da experiência.

6.12 EXPERIÊNCIA 9

Tabela 6-24: Condições operatórias da experiência 9

Condições operatórias $T = 145^{\circ}\text{C}$, velocidade = 6 m.s^{-1} , pressão absoluta = 2 bar
Tempo de injeção = 3 seg; intervalo de injeção = 180 seg; volume total de água injectada = $8,0 \text{ dm}^3$

Na Tabela 6-25 é apresentada a caracterização dimensional da tábua, durante as várias fases do processo.

Tabela 6-25: Caracterização dimensional da tábua 9 [mm]

Comprimento		Largura				Espessura				
a_1	a_2	b_1	b_2	b_3	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
<i>Antes de cortar as amostras da tábua</i>										
1000	999	151	150	151	26	26,5	26	26	25	25
<i>Depois de cortar as amostras da tábua</i>										
801	800	151	150	151	26	26,5	26	26	25	25
<i>Depois da secagem</i>										
799	798,5	148	146	145,5	25	25	24	24	24	23
Diferença em percentagem										
0,2	0,2	2,0	2,7	3,6	3,8	5,7	7,7	7,7	4,0	8,0

Após a secagem, verifica-se que todas as dimensões variaram principalmente a largura e espessura da tábua.

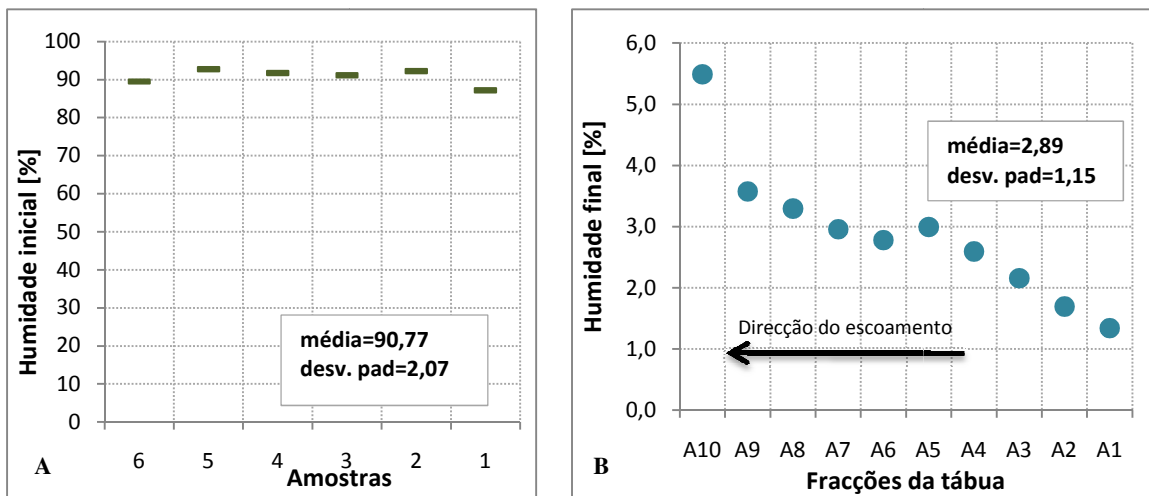


Figura 6-78: A – Humidade inicial da tábua 9; B – Humidade final da tábua 9

Os valores obtidos para a determinação da humidade inicial (Figura 6-78 – A) foram muito semelhantes, mesmo entre extremidades. Já na determinação da humidade final da tábua (Figura 6-78 – B), é a extremidade A1 que apresenta menor conteúdo de humidade, sendo seguida pelas fracções centrais da tábua e depois pela extremidade oposta, que apresenta um valor bastante elevado. Este facto pode ser provocado pela distância ao início do escoamento, e pela proximidade do local de injeção de água, como já foi visto anteriormente.

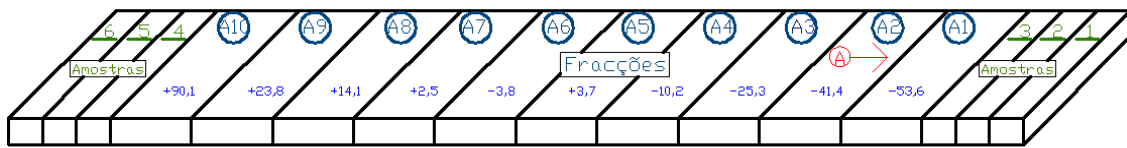


Figura 6-79: Localização das amostras e frações na tábua 9 e comparação com o valor médio de umidade final obtido, em %

Comparando com o valor médio de umidade (Figura 6-79), foi a fração A1 que perdeu maior quantidade de umidade, enquanto que a fração A10 tem um valor de umidade de 90,1% superior.

Nas figuras seguintes (Figura 6-80 – A e B, Figura 6-81 e Figura 6-82), podem-se observar os gráficos referentes às condições operatórias da experiência.

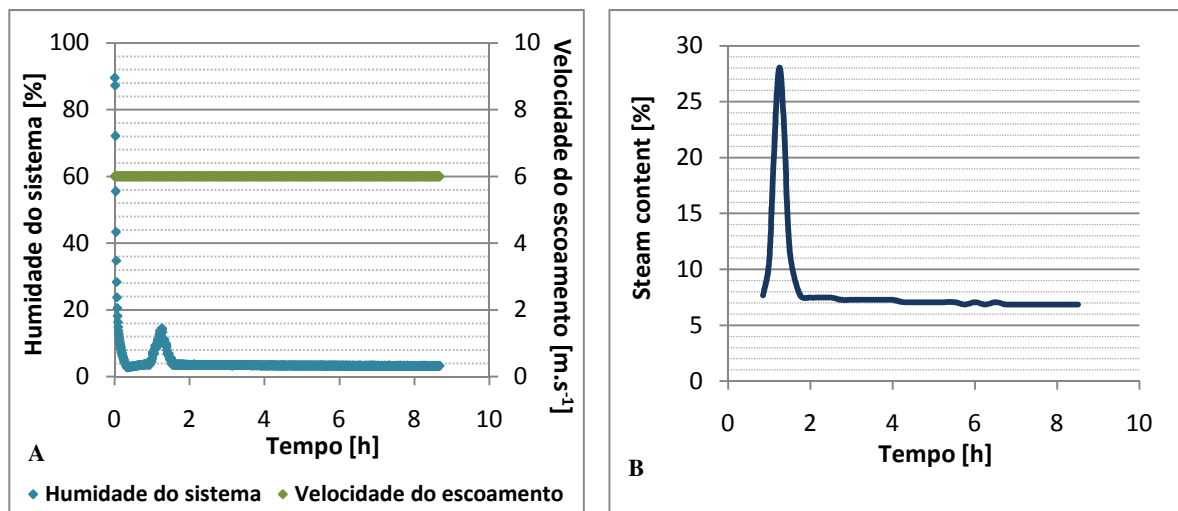


Figura 6-80: A – Evolução da umidade e velocidade do escoamento na experiência 9; B – Evolução do *steam content* na experiência 9

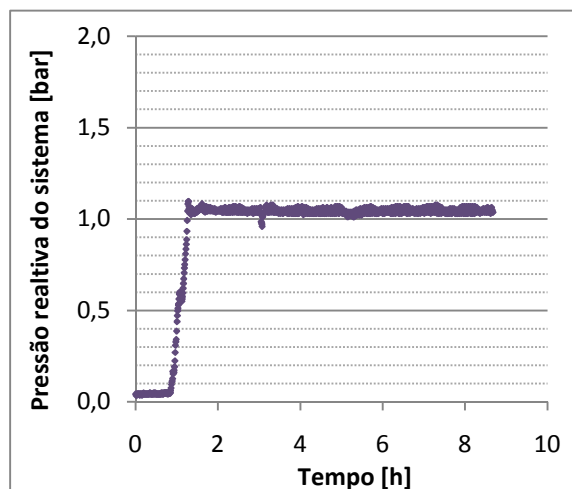


Figura 6-81: Evolução da pressão relativa do sistema durante a experiência 9

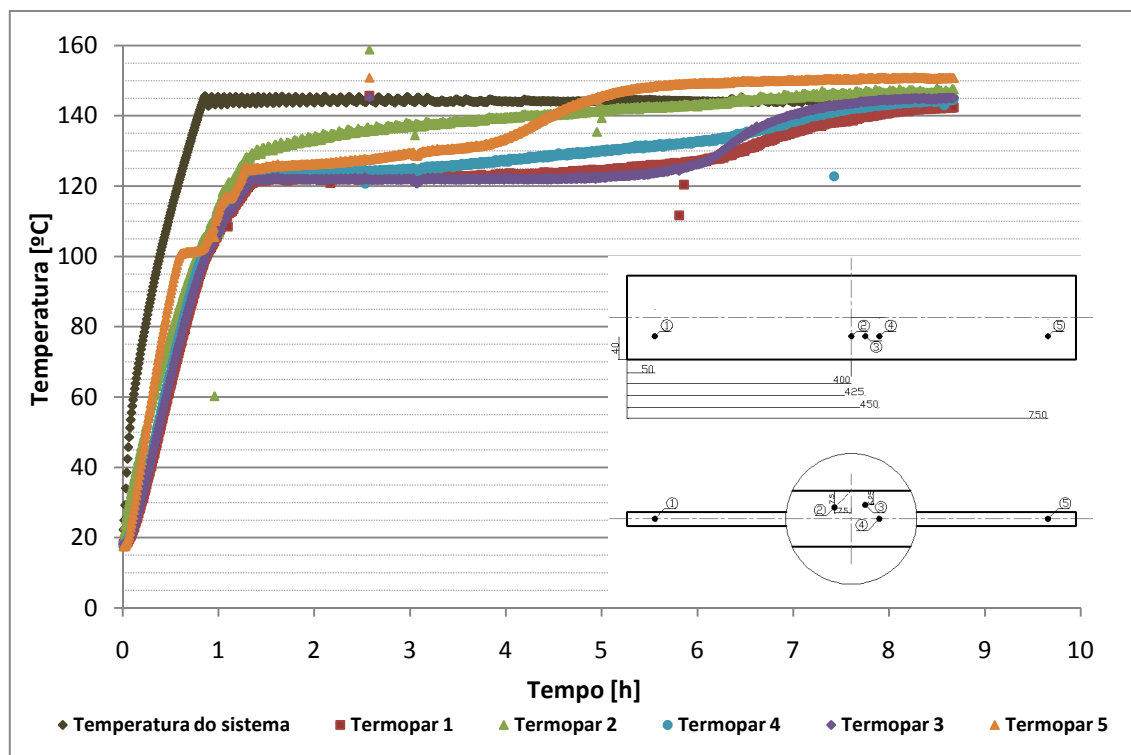


Figura 6-82: Evolução das temperaturas do sistema e na localização dos termopares na madeira durante a experiência 9

Pela análise do gráfico, pode-se observar que:

- A velocidade de ventilação manteve-se constante nos 6 m.s^{-1} ;
- Na fase de aquecimento, a humidade do sistema decresceu rapidamente, até atingir o valor próximo de zero;
- Após alcançar a temperatura pretendida e começar a injeção de água, a humidade relativa do sistema aumentou até 14,5%. No entanto, após alguns minutos voltou a diminuir mantendo-se próximo de zero até ao final da experiência.
- Pode-se observar que o sistema começou a ficar pressurizado após a 1ª hora de funcionamento, mantendo-se relativamente constante até ao final da experiência.

Nesta experiência, mesmo injectando maior quantidade de água, esta não foi suficiente para conseguir uma humidade relativa elevada no sistema pressurizado. Quando o sistema atinge a pressão absoluta de 2 bar, a humidade relativa decresce para valores próximos a zero e assim se mantém até ao final da experiência, como se pode observar na Figura 6-83.

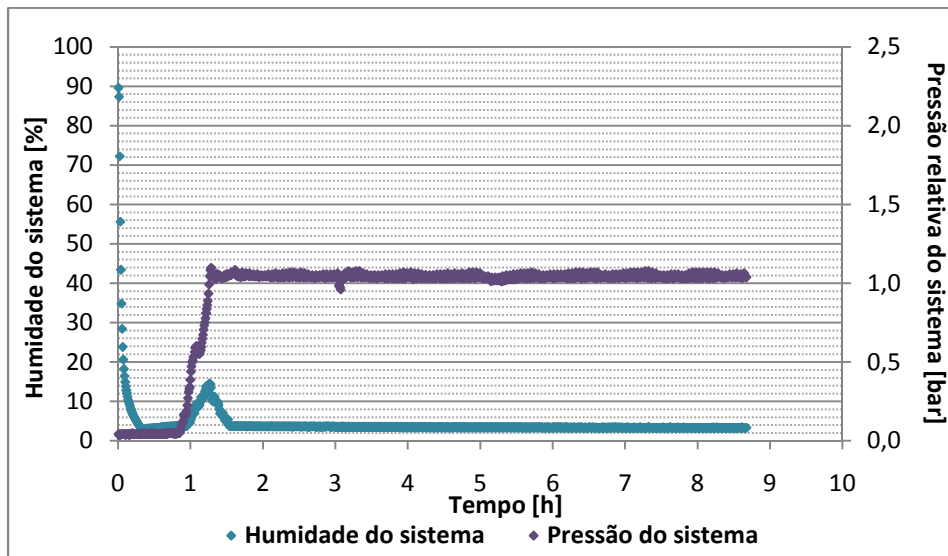


Figura 6-83: Evolução da humidade relativa e da pressão relativa do sistema ao longo da experiência

Devido aos problemas que ocorreram na experiência anterior, optou-se por continuar a injectar grandes quantidades de ar comprimido para conseguir manter a câmara pressurizada. Assim, por este motivo é que a humidade relativa diminui para valores próximos de zero logo que o sistema atinge 2 bar de pressão.

Da análise do comportamento das temperaturas, pode-se observar:

- Observa-se que as temperaturas de todos os locais acompanham o aquecimento do sistema, aumentando de forma constante, excepto no local L5 na extremidade mais próxima do início do escoamento, onde se observa um pequeno patamar horizontal nos 100°C, uma vez que o sistema ainda se encontrava à pressão atmosférica nesta altura (0,57 horas). Como a temperatura de saturação à pressão atmosférica é 100°C, o termopar registou temperatura constante enquanto era removida a humidade livre existente na zona do L5. Após esta fase, a pressão do sistema continuou a aumentar e o termopar do local L5 começou a registar novamente uma subida de temperatura, igualando os restantes locais.
- Aos 120°C (temperatura de bolbo húmido) todas as temperaturas estabilizam excepto à superfície, cuja temperatura continua a aumentar lentamente, atingindo a temperatura de operação no final da experiência.
- A temperatura do local L5 estabiliza pouco tempo nos 120°C, aumentando lentamente a sua temperatura, até que às 3,70 horas atinge o PSF, aumentando a sua temperatura rapidamente até atingir a temperatura de operação.
- Restam apenas os locais a 6,25 mm de profundidade (L3), a 12,5 mm de profundidade, no centro da tábua (L4) e na extremidade oposta ao início do escoamento (L1). Verifica-se

novamente, que L4 começa a aumentar primeiro a temperatura, sendo depois seguindo pelo L3 e por fim pelo local L1. No final da experiência, todos os locais atingem a temperatura de operação.

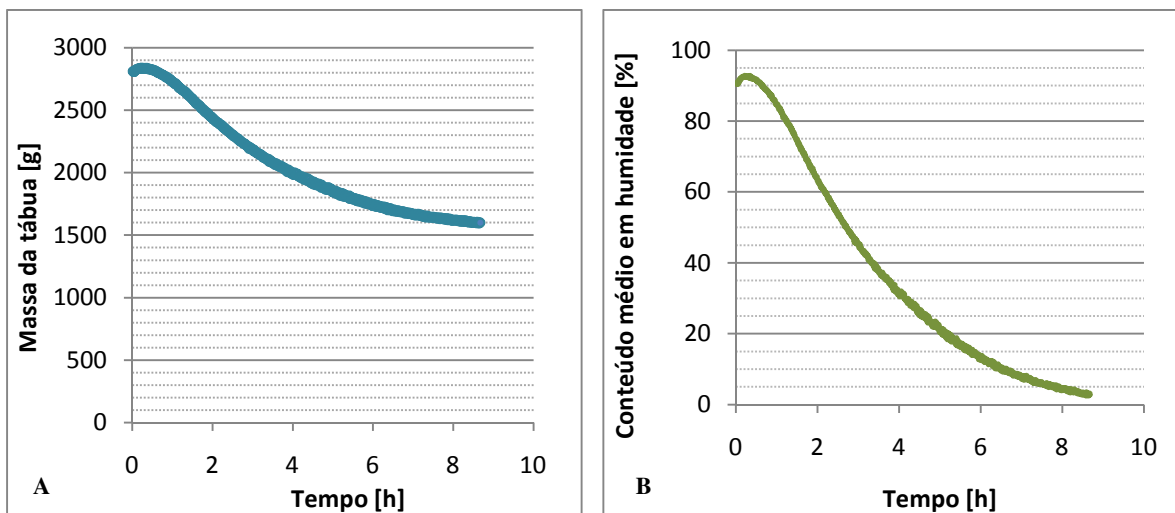


Figura 6-84: A – Massa da tábua 9; B – Conteúdo médio de humidade da tábua 9

Observando os gráficos anteriores, verifica-se que a massa da tábua (Figura 6-84 – A) diminui mais acentuadamente, tendendo a estabilizar no final da experiência, atingindo massa constante. Durante a experiência, a tábua perdeu cerca de 1212,3 g. O valor médio do conteúdo de humidade (Figura 6-84 – B) diminuiu desde o valor inicial de 90,8% para um valor final de 2,9% em cerca de 8,67 horas. A diminuição foi mais rápida durante a etapa inicial passando depois a diminuir mais lentamente com o progresso da secagem.

As figuras seguintes (Figura 6-85 – A e B) apresentam os valores da taxa de secagem, em função do tempo e em função do conteúdo de humidade.

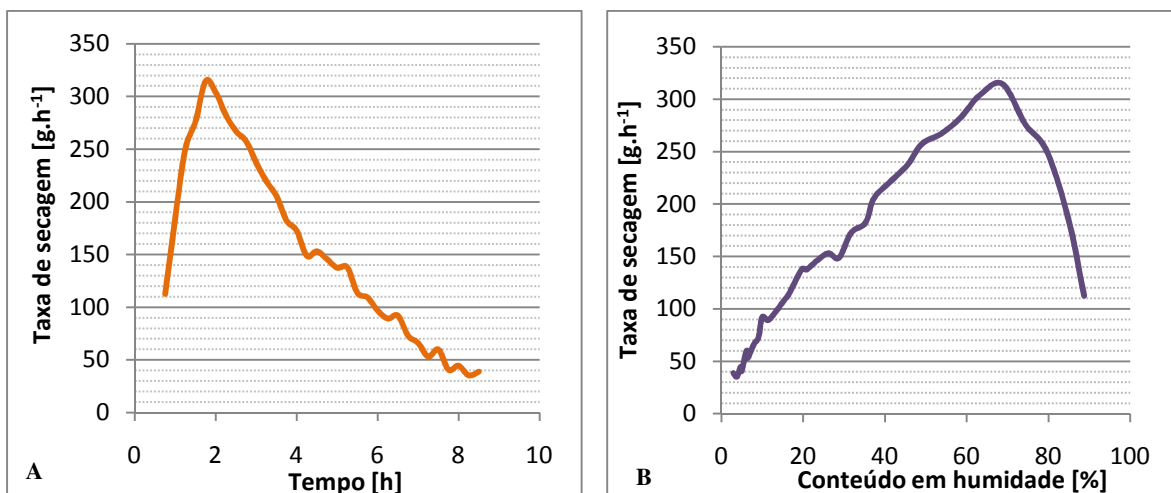


Figura 6-85: Taxa de secagem A – em função do tempo; B – em função do conteúdo de humidade

Pela análise do gráfico verifica-se a tendência de algumas experiências realizadas anteriormente, ou seja, existe uma fase crescente que culmina no ponto máximo de taxa de secagem ($314,7 \text{ g.h}^{-1}$), seguindo-se uma fase decrescente até ao final da experiência. Neste caso não se consegue distinguir muito bem se existe uma fase decrescente mais rápida seguida por outra mais lenta, como se conseguiu verificar anteriormente, em algumas experiências realizadas.

6.13 EXPERIÊNCIAS COMPLEMENTARES

Para complementar este trabalho experimental, foram realizadas mais três experiências de modo a que permitam retirar algumas dúvidas sobre certos resultados obtidos. De facto, verificou-se que em algumas experiências, os valores de humidade relativa eram extremamente baixos. Sem saber com certeza qual a causa, optou-se por realizar duas experiências, sem utilizar tábua para secagem. Os resultados obtidos são apresentados nos próximos pontos.

6.13.1 PRESSÃO ATMOSFÉRICA E TEMPERATURA DE 145°C

As condições operatórias utilizadas nesta experiência são semelhantes à experiência 3, excepto o tempo de injeção de água. Na experiência 3, a água era injectada durante 1 segundo com 180 segundos entre injeções. Nesta experiência, a água foi injectada durante 5 segundos, com 180 segundos entre injeções. Os resultados obtidos podem ser observados nas Figura 6-86, Figura 6-87 e Figura 6-88.

De facto, pode-se observar que a injeção de maior quantidade de água, provoca um aumento de humidade relativa no sistema e por conseguinte, maiores valores de *steam content*.

Pelos conceitos termodinâmicos, tem-se:

$$HR = \frac{P_{wv}}{P_{sat}} \times 100 = \frac{1,013 \text{ bar}}{4,154 \text{ bar}} \times 100 = 24,4\%$$

Logo, se o conteúdo de vapor dentro da câmara de secagem fosse 100%, a humidade relativa, em teoria, seria 24%.

Conclui-se então, que os valores baixos de humidade relativa observados na experiência 3 devem-se ao facto de se injectar pouca água, quando a experiência ocorre a temperaturas tão elevadas.

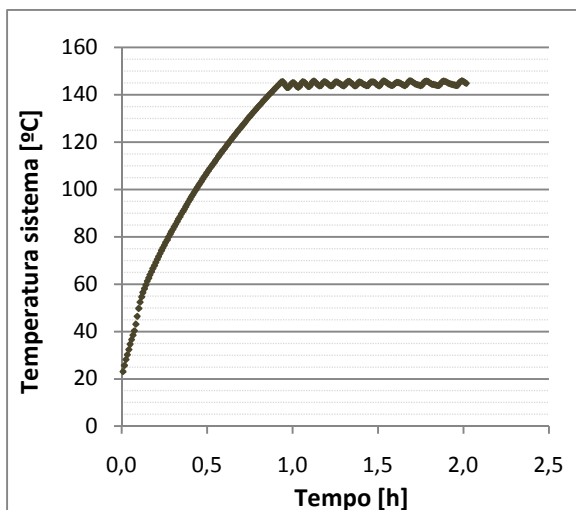


Figura 6-86: Temperatura do sistema

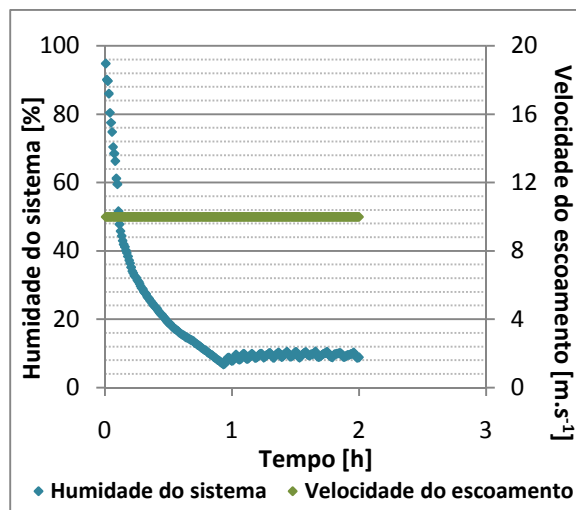


Figura 6-87: Humidade e velocidade do escoamento

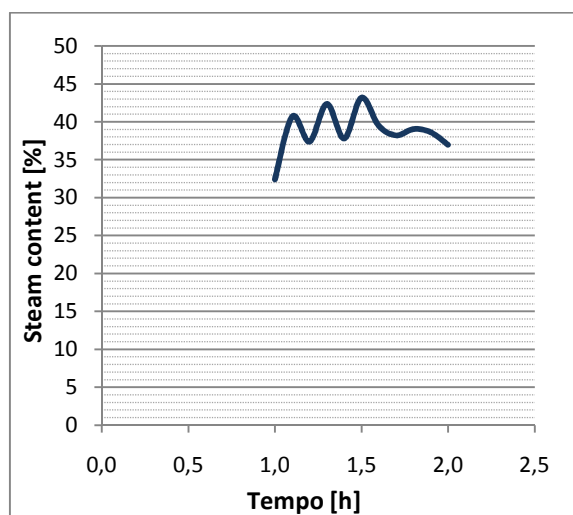


Figura 6-88: Steam content

6.13.2 PRESSÃO 1,5 BAR E TEMPERATURA DE 145°C

As condições operatórias desta experiência são semelhantes à experiência 6, excepto na injeção de água no sistema que durou cerca de 5 segundos. Os resultados obtidos podem ser observados nas Figura 6-89, Figura 6-90, Figura 6-91 e Figura 6-92.

Novamente, verifica-se um aumento na humidade relativa do sistema e no *steam content*, o que prova que as baixas humidades observadas anteriormente, são provocadas pela pouca quantidade de água injectada durante a experiência.

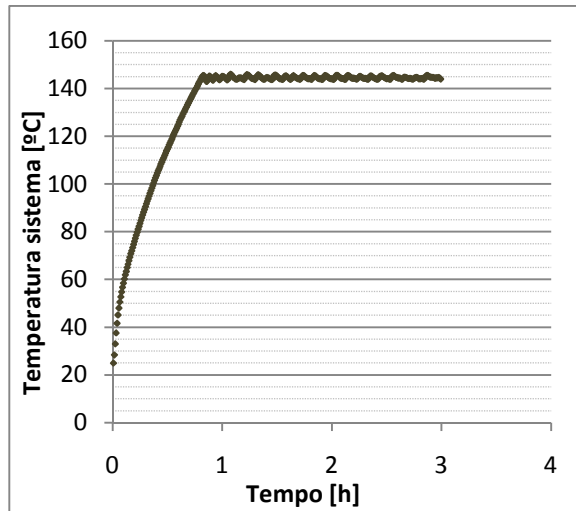


Figura 6-89: Temperatura do sistema

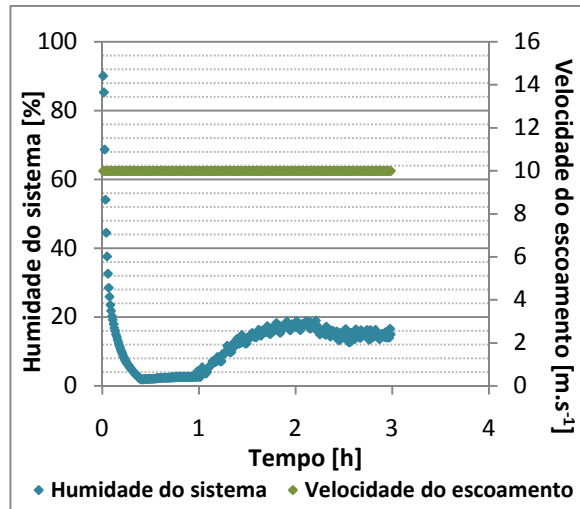


Figura 6-90: Humidade e velocidade do escoamento

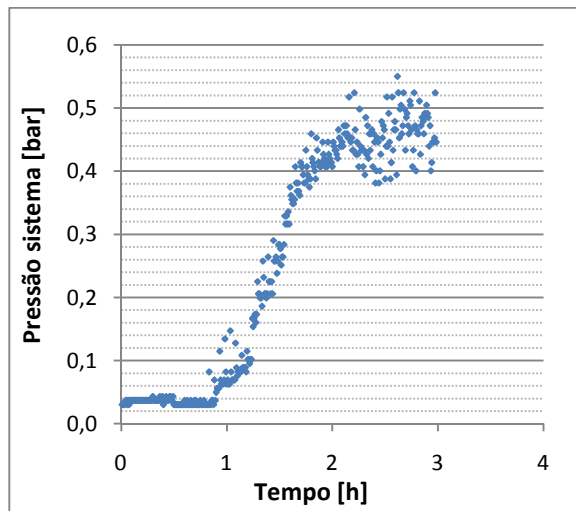


Figura 6-91: Pressão do sistema

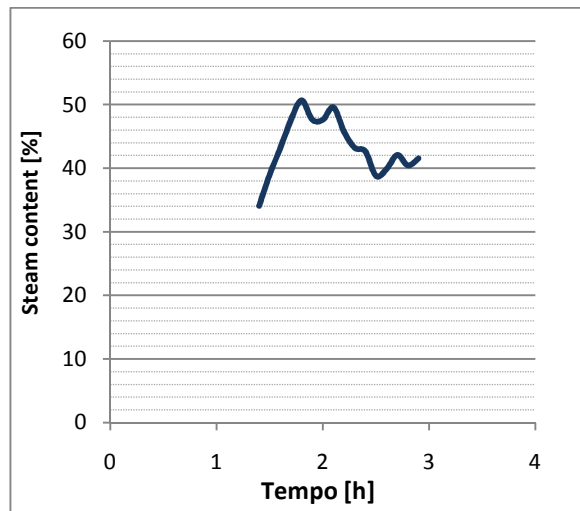


Figura 6-92: Steam content

Para confirmar, pelos conceitos termodinâmicos:

$$HR = \frac{P_{wv}}{P_{sat}} \times 100 = \frac{1,013 \times 1,5 \text{ bar}}{4,154 \text{ bar}} \times 100 = 36,6\%$$

Caso a pressurização fosse efectuada apenas com água, ou seja, sem a influência do ar comprimido injectado, obter-se-ia uma humidade relativa de 36,6% e um *steam content* de 100%. Contudo, com a influência da injeção de ar comprimido, o *steam content* será menor assim como a humidade relativa.

6.13.3 EXPERIÊNCIA 6**

Uma das dúvidas que também surgiu foi o facto de, na maioria das experiências, as fracções A9 e A10 apresentarem teores de humidade bastante superiores às restantes fracções, possivelmente, devido ao facto desta extremidade se encontrar muito próxima do local de injeção de água e

distanciada do início do escoamento. Assim, aproveitando o facto da experiência 6 ter sido realizada com e sem injeção de água (experiência 6 e 6*, respectivamente) decidiu-se repetir esta experiência, mantendo as condições operatórias da experiência 6, apenas com a diferença de, após a secagem, deixar estabilizar a tábua durante pelo menos 24 horas, para perceber se o conteúdo de humidade na tábua se tornaria mais homogéneo.

Por isso, após a realização da secagem em condições operatórias semelhantes à experiência 6 e da abertura da instalação, a tábua ficou a repousar no local de secagem mas em contacto com o ar ambiente exterior, durante cerca de 36 horas.

É conveniente referir que os dados obtidos da leitura dos termopares e humidade relativa do sistema eram semelhantes à experiência 6, pelo que não são representados aqui.

Os dados obtidos da humidade final da tábua 6** são apresentados juntamente com os dados obtidos anteriormente das experiências 6* e 6.

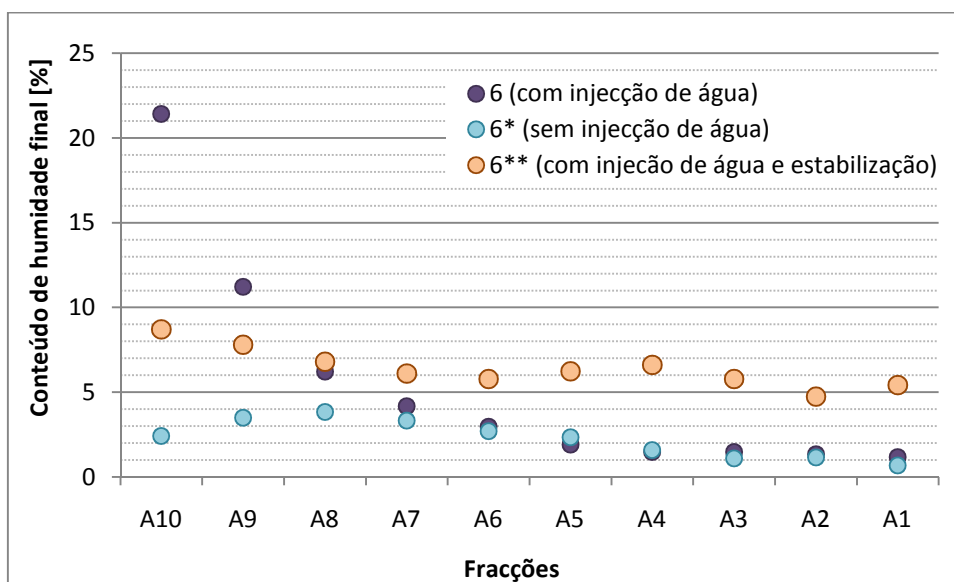


Figura 6-93: Comparação das humidades finais das fracções das experiências 6, 6* e 6**

Observando a Figura 6-93, verifica-se que:

- Comparando a exp 6* (sem injeção de água) e 6 (com injeção de água) observa-se que apenas existem diferenças significativas entre as fracções A9 e A10, sendo que os valores das restantes fracções são idênticos;
- Já na experiência 6** observou-se que os valores das fracções são mais homogêneos, provavelmente devido ao efeito provocado pela estabilização da tábua, que provocou a migração da humidade das fracções A9 e A10 para as restantes fracções, originando uma uniformidade de humidade na tábua. Observa-se também que nas fracções localizadas no início do escoamento têm conteúdos de humidade mais elevados do que as restantes

experiências, podendo ser provocado por alguma absorção de humidade do meio exterior. Contudo, é impossível concluir com certeza se este facto se deve exclusivamente à estabilização da tábua ou a outros factores decorrentes do processo, sendo necessário para confirmação a realização de mais experiências.

7 ANÁLISE GLOBAL DE RESULTADOS

7.1 CARACTERIZAÇÃO DIMENSIONAL DAS TÁBUAS

Para saber qual a influência da secagem nas dimensões das tábuas efectuou-se medições em várias localizações, antes e depois da secagem, para assim, determinar as alterações que eventualmente poderiam ocorrer. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 7-1.

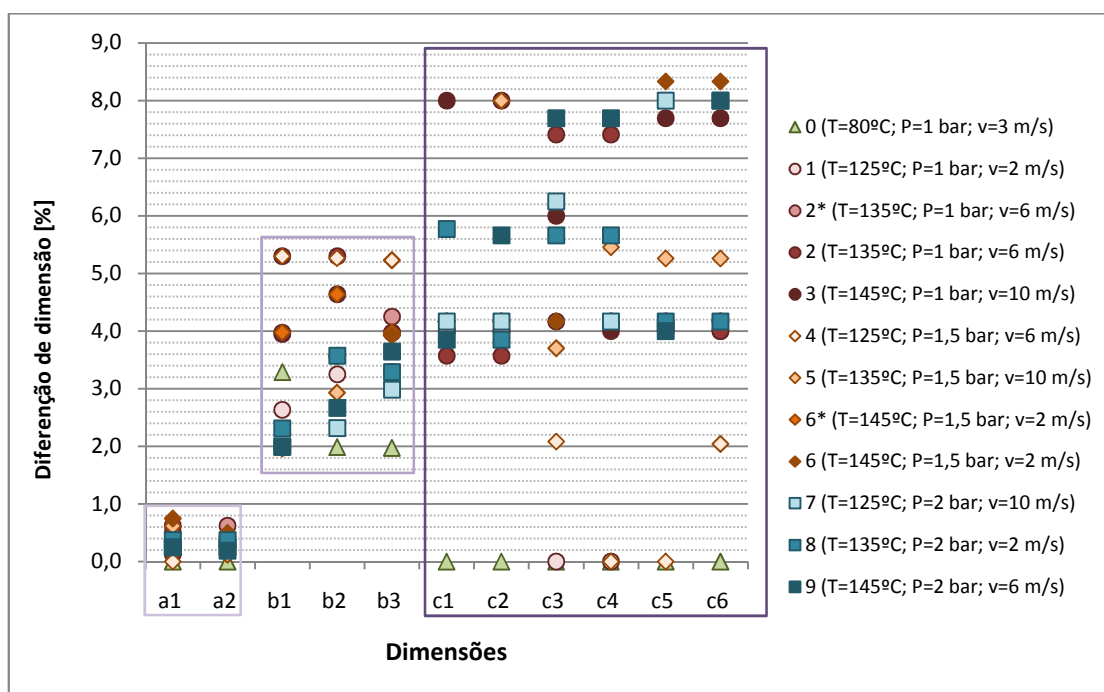


Figura 7-1: Diferença de dimensões das tábuas, provocada pelo processo de secagem

Analisando o gráfico da caracterização dimensional:

- Observa-se claramente que a dispersão de valores se distribui consoante a dimensão analisada, ou seja, ao nível do comprimento, a diferença de valores antes e depois da secagem é menor que 1%; já na largura, a dispersão de valores é um pouco superior, variando entre 2% e 5,3%; quanto à espessura, verifica-se uma maior dispersão de valores, situando-se na gama de 0% a 8,3%;
- Os valores de diferença de dimensões observados não apresentam tendências que mostrem a influência das condições operatórias, o que leva a concluir que as diferenças que se observam são provocadas pela direcção dos veios e pelo conteúdo de humidade da tábua:
 - Veios das tábuas: dependendo da sua direcção e orientação, poderá influenciar a ocorrência de torção e por conseguinte a diferença de valores das dimensões;

- Conteúdo de humidade na tábua: a madeira tende a contrair-se conforme vai secando e expandir-se ao absorver a humidade, podendo provocar diferenças na dimensão da tábua (Costa, 2006).
- Contudo, observando a Figura 7-2 é possível observar que, a tábua referente à experiência 0 (secagem convencional) é a que sofre menores diferenças de valores, enquanto que a tábua referente à experiência 3, é a que apresenta maiores diferenças percentuais nas dimensões. É possível concluir que para a secagem convencional tem-se menores valores nas diferenças dimensionais face à secagem a alta temperatura e pressurizada.

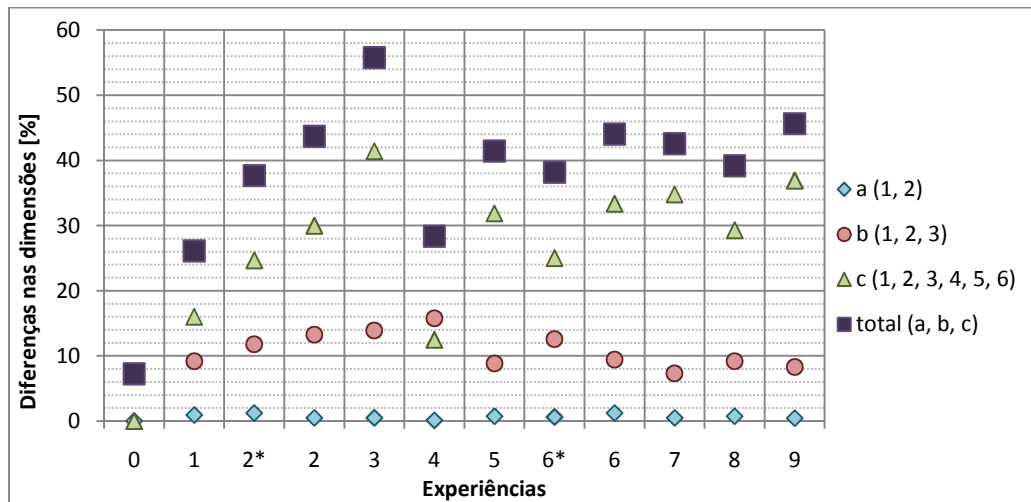


Figura 7-2: Diferenças de dimensões em função do tipo de dimensão

7.2 CONTEÚDO DE HUMIDADE INICIAL

Antes da realização de cada experiência, foi calculado, conforme descrito no Capítulo 5, a humidade inicial de cada tábua. Os valores obtidos encontram-se apresentados na Figura 7-3.

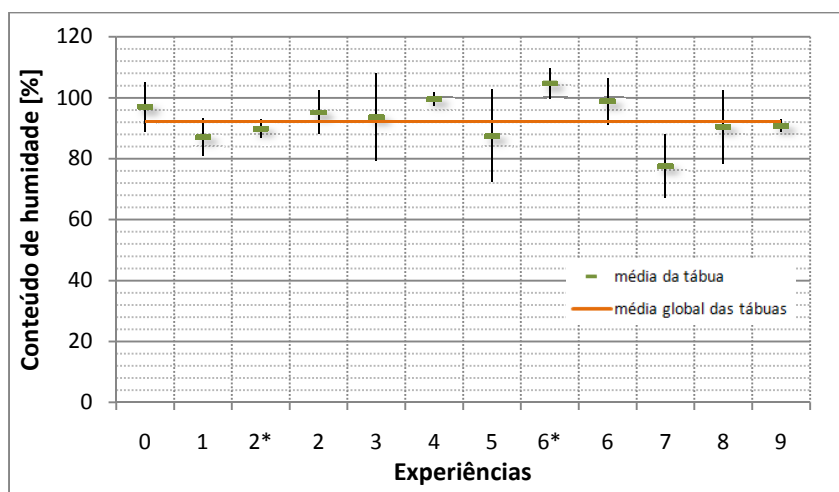


Figura 7-3: Conteúdo de humidade inicial das tábuas e média global

Da análise da figura, resultam as seguintes observações:

- As tábuas apresentam conteúdos de humidade iniciais bastante uniformes, na gama de 87% a 100%, excepto a tábua relativa à experiência 6*, com humidade inicial de 104,78% e a tábua referente à experiência 7, com humidade inicial de 77,55%.
- A variabilidade dos valores obtidos das amostras é bastante reduzida, com excepção das experiências 3, 5, 7 e 8, provocada pela diferença de valores de humidade entre extremidades da tábua, o que poderá influenciar os valores de humidade final obtidos após a secagem.

7.3 TAXA DE SECAGEM

A taxa de secagem é um parâmetro que pode sofrer influência de determinados factores, tanto internos relacionados com a própria madeira como externos relacionados com as condições operatórias envolvidas no processo de secagem, sobre as quais a madeira estará sujeita.

Segundo Klitzke (2009), quanto mais elevada for a temperatura do ar, maior será a taxa de remoção da humidade do interior para a superfície. A velocidade de evaporação depende da quantidade de energia (calor) aplicada por unidade de tempo e de capacidade do meio (ar) para absorver a humidade da madeira.

A humidade relativa determina a capacidade de secagem do ar. Ar seco tem alta capacidade de secagem e de absorver mais humidade na forma de vapor de água.

A velocidade do ar controla a evaporação da água no processo de secagem sendo muito importante nas primeiras etapas da secagem artificial. Velocidades do ar superiores devem ser aplicadas no início da secagem se for possível. A importância da velocidade do ar diminui à medida que o teor de humidade da madeira se aproxima do PSF. A velocidade do ar perde eficiência abaixo do PSF por iniciar o processo físico extremamente lento de retirada da água da madeira (Klitzke, 2009).

Posto isto, para facilitar a análise conjunta dos dados das experiências realizadas, estas foram agrupadas em função das condições operatórias comuns, ou seja, na primeira linha estão representadas as experiências divididas conforme a temperatura de operação; na segunda linha foram agrupadas conforme a sua pressão de operação e por fim na terceira linha, as experiências foram agrupadas segundo a velocidade de operação.

Deste modo, irá fazer-se uma análise sobre a influência das condições operatórias na taxa de secagem em função do conteúdo de humidade.

7.3.1 EXPERIÊNCIAS A TEMPERATURA CONSTANTE – GRUPO T

O grupo T compreende os gráficos T_{125} , T_{135} e T_{145} que apresentam todas as experiências agrupadas segundo a sua temperatura de operação.

O gráfico T_{125} apresenta as experiências 1, 4 e 7, que são realizadas a 125°C, com pressão e velocidade variável. Observa-se que a experiência com maior taxa de secagem é a exp 4, seguida da exp 1 e por fim a 7. Contudo não seria correcto comparar a exp 1 com as restantes, uma vez que esta ainda é realizada com as resistências de aquecimento de aproximadamente 5kW e as restantes já a 12kW. Este facto provocou um comportamento da taxa de secagem diferente das restantes experiências: a fase de aquecimento foi mais lenta, permitindo assim, a remoção da água livre de uma forma constante (formação de um plano horizontal). Já nas restantes experiências esta fase constante não ocorre, traduzindo-se a taxa de secagem, simplesmente, em fase crescente, pico máximo e fase decrescente. Contudo relacionando as exp 4 e 7 é permitido retirar algumas conclusões: a exp 4 apresenta uma taxa de secagem superior relativamente à exp 7, o que se pode concluir que a pressão provoca uma diminuição da taxa de secagem. Contudo convém referir que a taxa de secagem da exp 7 pode ter sido afectada pelo conteúdo de humidade inicial da tábua que é o mais baixo e pelo valor de *steam content* que é dos mais elevados.

Apesar de a velocidade aumentar da experiência 4 para a 7, não é possível aqui comprovar exactamente qual a influência desta variável na taxa de secagem.

No gráfico T_{135} estão representadas as exp 2*, 2, 5 e 8. Como já foi explicado em relação à exp 1, também não seria correcto comparar a exp 2* com as restantes devido à menor potência em funcionamento e também neste caso, devido ao facto de não ter sido atingida a temperatura pretendida e injectada água no sistema. A experiência que apresenta maior taxa de secagem é a 5, seguida pela 2 e por fim a exp 8, permitindo concluir que a taxa de secagem aumenta com o aumento da velocidade de circulação e com a diminuição do *steam content*, uma vez que este na exp 5 é muito inferior ao obtido na exp 2. Ao contrário da experiência anterior não se consegue distinguir a influência da pressão na secagem. Convém lembrar que a exp 8 apresentou alguns problemas operacionais o que pode ter afectado os valores da taxa de secagem.

O gráfico T_{145} apresenta as experiências 3, 6*, 6 e 9. Comparando as exp 6* (sem injeção de água) e 6 (com injeção de água), observa-se que a primeira tem uma taxa de secagem superior à exp 6. Interessante parece ser o facto do *steam content* ser muito próximo nas duas experiências. Quanto à comparação entre as exp 3, 6 e 9, verifica-se que a exp 3 tem uma taxa de secagem muito superior às restantes experiências, sendo mesmo a mais elevada da totalidade das experiências realizadas.

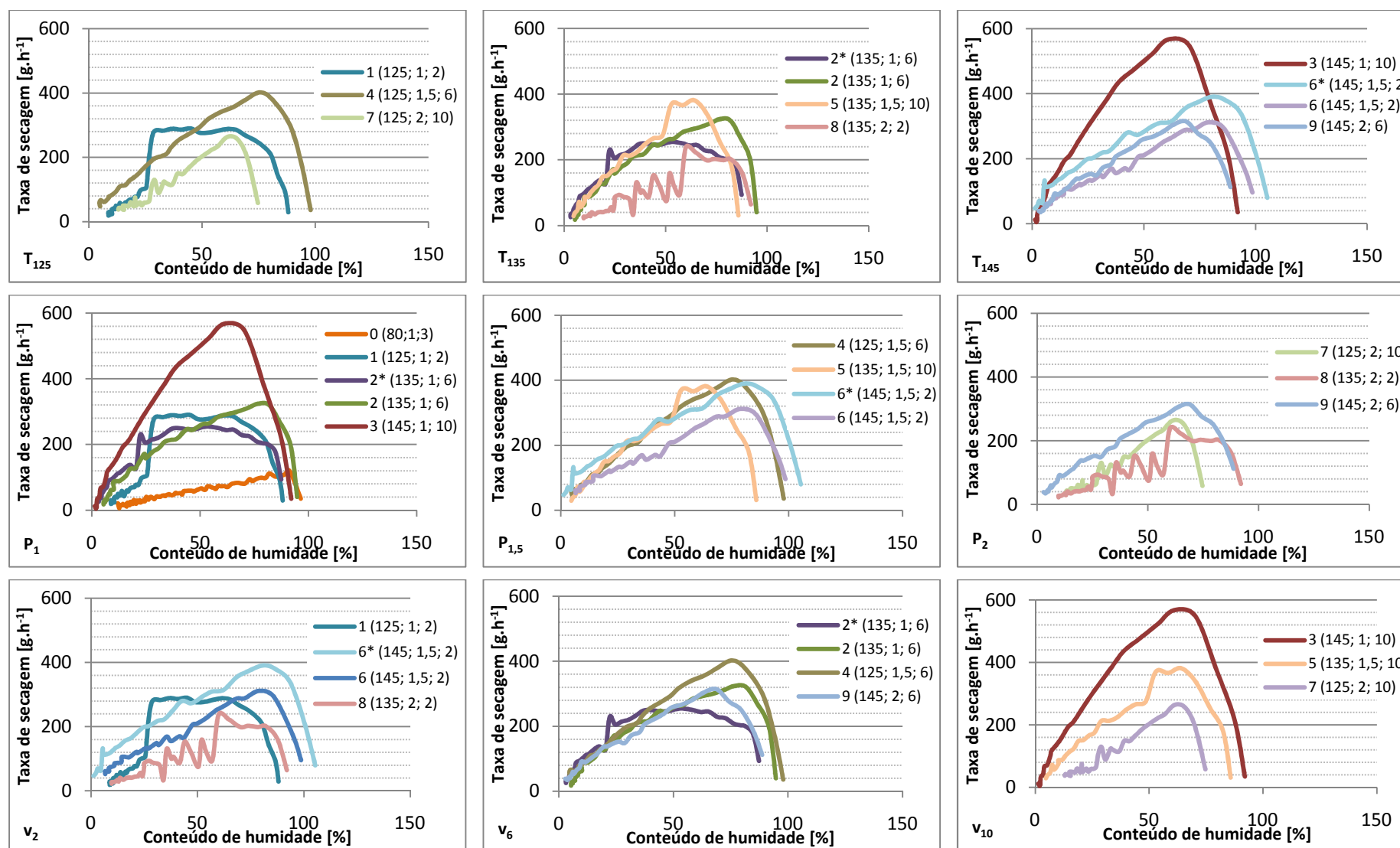


Figura 7-4: Taxa de secagem das experiências (legenda da experiências: n.º da exp (T; P; v))

Este facto vem comprovar as conclusões gerais abordadas no início do ponto 7.3, ou seja, a exp 3 beneficiou da combinação de 3 factores muito importantes na secagem: temperatura elevada, velocidade elevada e pressão baixa. Entre a exp 6 e 9 não existem grandes diferenças na taxa de secagem, atingindo ambas um valor muito próximo. A explicação para este facto pode estar nas condições operatórias utilizadas, ou seja, apesar da exp 9 ocorrer a uma pressão mais elevada do que a exp 6 (o que baixaria a taxa de secagem), a sua velocidade é mais elevada o que pode compensar eventuais perdas de velocidade de remoção de humidade durante a secagem.

7.3.2 EXPERIÊNCIAS A PRESSÃO CONSTANTE – GRUPO P

O grupo P engloba os gráficos P_1 , $P_{1,5}$ e P_2 que apresentam todas as experiências agrupadas segundo a pressão de operação.

O gráfico P_1 apresenta as experiências 0, 1, 2*, 2 e 3. Novamente neste conjunto não se pode comparar directamente as exp. As exp 0, 1 e 2* foram efectuadas com a potência de aproximadamente 5kW, enquanto que as exp 2 e 3 foram realizadas com a potência de 12 kW. Além disso, a exp 2* não atingiu a temperatura pretendida.

Comparando as primeiras 3 experiências observa-se que a exp 0 tem a taxa de secagem mais baixa, devido à baixa temperatura de operação. Segue-se a exp 1 e 2* com taxas de secagem similares. Aqui, deveria verificar-se que a exp 2* teria taxa de secagem mais elevada que a exp 1 uma vez que a temperatura e a velocidade seriam mais elevadas, mas como na exp 2* não foi atingida a temperatura de operação, é provável que tenha influenciado a taxa de secagem. Comparando agora as exp 2 e 3 observa-se que a exp 2 apresenta uma taxa de secagem bastante menor que a exp 3, provavelmente devido à menor temperatura e menor velocidade. Apenas o aumento de 10°C na temperatura e o aumento de 6 m.s⁻¹ para 10 m.s⁻¹ provocou um aumento de 75% no ponto máximo de taxa de secagem da exp 2 para a exp 3.

O gráfico $P_{1,5}$ engloba as experiências 4, 5, 6* e 6 que ocorrem a 1,5 bar. Comparando as exp 4, 5 e 6 pode-se observar que a exp 4 e 5 apresentam taxas de secagem muito semelhantes enquanto que a exp 6 apresenta uma taxa de secagem menor que as exp 4 e 5. Isto pode dever-se à influência que a velocidade tem na fase inicial de remoção de humidade, ou seja, até atingir o PSF a exp 6, apesar de ser realizada a temperatura superior, como tem velocidade de operação baixa vai obter uma taxa de secagem menor, sendo que após atingir o PSF a velocidade de operação perde a sua influência na secagem, obtendo-se taxas de secagem muito semelhantes.

O gráfico P_2 apresenta as experiências 7, 8 e 9 cuja pressão de operação é 2 bar. Devido aos problemas que ocorrem durante a exp 8, não será correcto analisar esta experiência em conjunto com as restantes. Observa-se que a exp 9 apresenta maior taxa de secagem, seguida pela exp 7. Isto

deve-se ao facto de a exp 9 ser realizada a temperatura superior e, embora a diferença de velocidades não seja muito grande, a exp 7 apresenta um *steam content* mais elevado, enquanto que a exp 9 tem um *steam content* menor, uma vez que o sistema foi pressurizado à base de ar seco, devido aos problemas que ocorreram na exp 8, onde foi necessário recorrer a maior quantidade de injeção de ar para manter o sistema pressurizado.

7.3.3 EXPERIÊNCIAS A VELOCIDADE CONSTANTE – GRUPO V

O grupo v engloba os gráficos v_2 , v_6 e v_{10} que apresentam todas as experiências agrupadas segundo a velocidade de operação, com pressão e temperatura variável.

O gráfico v_2 apresenta as exp 1, 6*, 6 e 8, que foram realizadas à velocidade de 2 m.s^{-1} . Como já foi abordado anteriormente, as experiências 1 e 6* não serão incluídas nesta análise. Comparando então as experiências 6 e 8 observa-se que a exp 6 apresenta maior taxa de secagem, devido ao efeito da temperatura superior e pressão menor, do que a exp 8. Convém referir contudo que a exp 8 apresentou muitos problemas operacionais o que pode ter afectado os valores de taxa de secagem.

O gráfico v_6 engloba as exp 2*, 2, 4 e 9, que foram realizadas à velocidade de 6 m.s^{-1} . Comparando as exp 2, 4 e 9 observa-se que a exp com taxa de secagem superior é a 4, seguida pelas exp 2 e 9, que apresentam taxas de secagem muito semelhantes. A exp 4 tem taxa de secagem superior devido ao baixo valor de *steam content*, face à exp 2 que tem temperatura superior e *steam content* mais elevado de todas as experiências. Já a exp 9, por ter uma pressão elevada, vai apresentar uma temperatura de bolbo húmido superior, fazendo com que a taxa de evaporação da humidade diminua. Verifica-se que a partir do momento em que atingem o PSF, as taxas de secagem das experiências são homogéneas.

O gráfico v_{10} apresenta as exp 3, 5 e 7. A exp 3 apresenta maior taxa de secagem, seguida pela exp 5 e por fim pela exp 7. Este facto é devido à influência da temperatura, pressão e *steam content* apresentado pelas experiências, ou seja, a exp 3 apresenta temperatura superior, pressão baixa e baixo *steam content*, enquanto que a exp 7 apresenta temperatura inferior, pressão elevada e *steam content* superior.

7.4 CONTEÚDO MÉDIO DE HUMIDADE

Para se proceder à comparação do conteúdo médio de humidade das experiências teve que se proceder à sua adimensionalização, sendo por essa razão, que os gráficos apresentados iniciam no valor 1 e terminam no valor 0.

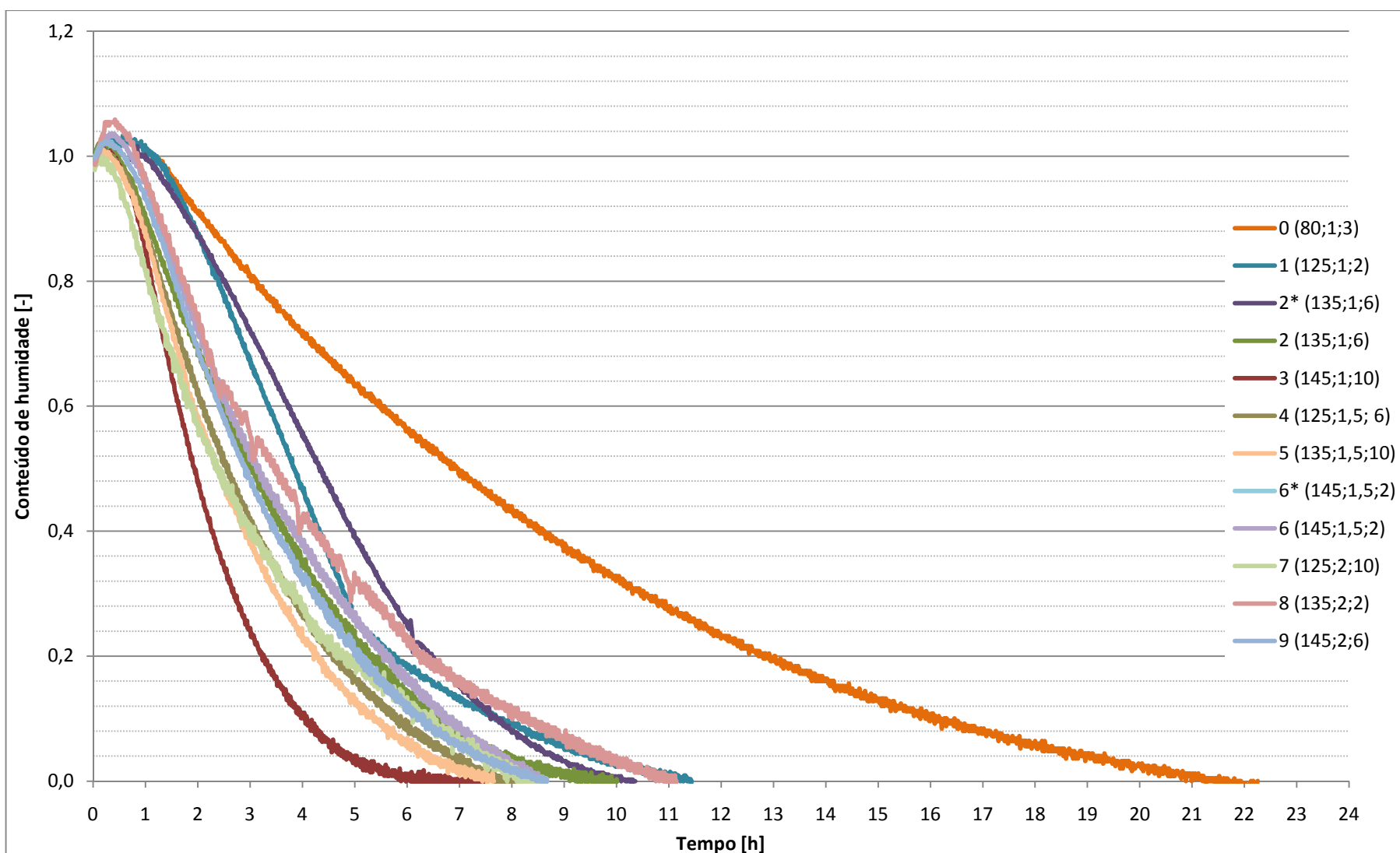


Figura 7-5: Conteúdo de umidade adimensionalizado, em função do tempo das experiências

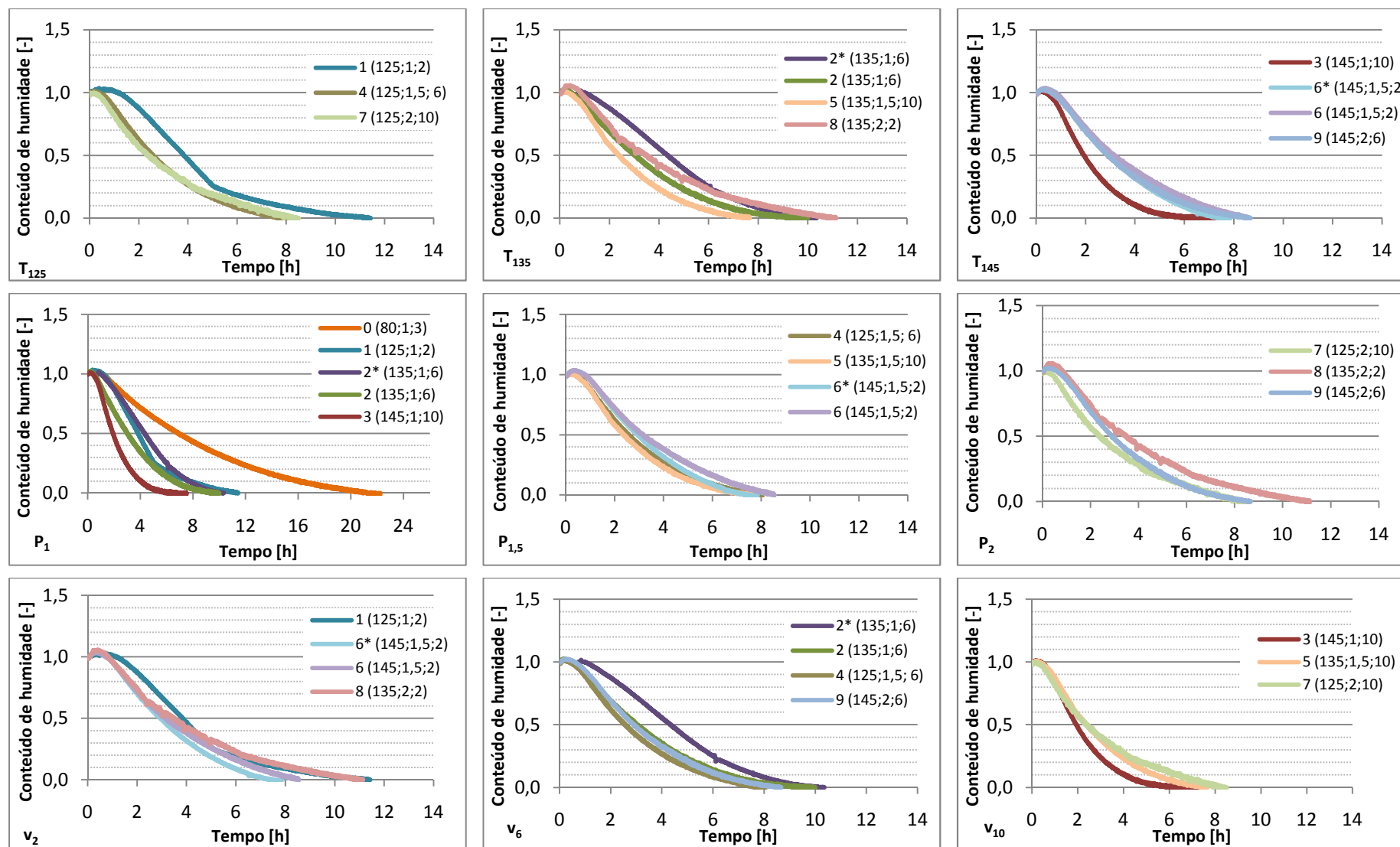


Figura 7-6: Conteúdo médio de humidade (legenda da experiências: n.º da exp (T; P; v))

Verifica-se em todas as experiências, que nos momentos iniciais existe um pequeno aumento no valor do conteúdo médio de humidade. Este aumento é provocado pelas variações da massa da tábua no início da experiência, como já foi explicado anteriormente. Convém também referir que existem determinadas experiências cujo termopar colocado no lado da injeção de água (L1) não chegou a registar a temperatura de bolbo seco, pelo que seria necessário mais tempo para concluir a secagem. Contudo, como este facto só se verificou numa área bastante pequena da tábua, correspondente à amostra A10 (10% da tábua), este facto foi relevado nesta análise, considerando que cada experiência tinha atingido o seu final.

Desta análise, apesar de serem apresentadas, foram excluídas da comparação directa as exp 0, 1, 2*, 6* e 8, por não ocorrerem nas condições pretendidas.

Analisando agora os gráficos apresentados, tem-se:

- Observa-se que a experiência 3 foi a que demorou menos tempo a ser concluída, enquanto que a exp 0 demorou mais tempo a ser concluída; mais à frente irá verificar-se que o conteúdo de humidade final da exp 3 é o mais baixo enquanto que o da exp 0 é um dos mais elevados.
- A temperatura parece ter uma influência no tempo de secagem, ou seja, quanto maior for a temperatura, mais rápida será a secagem; este facto pode ser comprovado pela análise dos gráficos T_{125} , T_{135} e T_{145} , onde se verifica que o tempo de secagem diminui à medida que a temperatura aumenta.
- Quanto à pressão, parece haver uma tendência de aumento do tempo de secagem com o aumento da pressão. No entanto, com estes dados analisados, não é possível fazer uma análise mais conclusiva.
- Relativamente à velocidade, verifica-se claramente que quanto maior o seu valor, menor será o tempo de secagem. Este facto deve-se à importância desta variável na fase de remoção de água livre da tábua até atingir o PSF, ou seja, uma experiência com maior velocidade, irá remover a água livre rapidamente, comprovando-se isto pela observação do declive dos gráficos, onde são mais acentuados na parte inicial das experiências.

7.5 CONTEÚDO DE HUMIDADE FINAL

Após a secagem, foi determinado o conteúdo de humidade final das tábuas, conforme é indicado no planeamento experimental. Os resultados encontram-se apresentados na Figura 7-7.

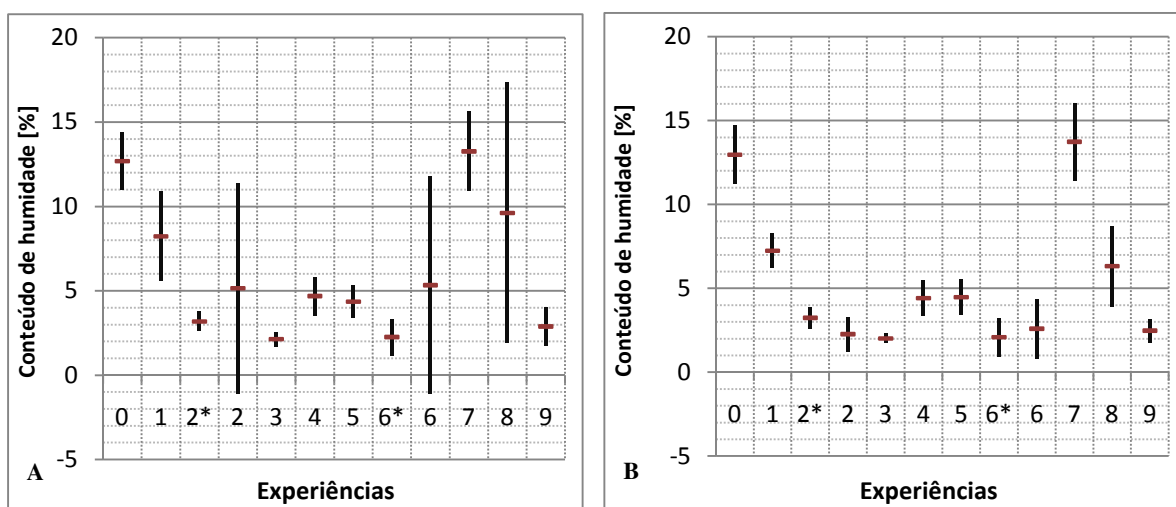


Figura 7-7: Conteúdo de humidade final A – da tábuas, B – exceptuando as amostras A9 e A10

Observando a Figura 7-7 – A, destaca-se, novamente, a experiência 3 (7,52 horas) pela sua média de conteúdo de humidade final baixa (2,14%) e menor variabilidade de valores face à experiência 7 (8,51 horas), que é a que apresenta maior conteúdo de humidade final (13,27%). Pode-se relacionar este facto com a maior ou menor diferença entre a temperatura de bolbo seco e temperatura de bolbo húmido, ou seja, a experiência 3 tem a maior diferença, cerca de 45°C, permitindo uma maior remoção de humidade enquanto que a experiência 7 apresenta uma menor diferença entre temperaturas (5°C), levando a uma maior dificuldade de remoção de humidade. É de destacar também a experiência 0 que tem também um valor de humidade final bastante elevado de 12,68%, mas desta vez devido à temperatura média a que ocorre a experiência. Salienta-se também que as experiências 2* e 6*, nas quais não foi injectado água no sistema, obtiveram-se valores mais baixos de humidade final e homogeneidade. Contudo, convém referir que muitos destes valores vêm afectados pelo grande conteúdo de humidade final que algumas amostras A9 e A10 apresentam, devido à influência da injeção de água no sistema e distância ao início do escoamento. Na Figura 7-7 B pode-se verificar que, se o cálculo do conteúdo de humidade final não incluísse as amostras A9 e A10, os valores obtidos seriam diferentes, principalmente nas experiências 2, 6 e 8, onde o valor médio de conteúdo de humidade diminuiu, assim como a variabilidade dos valores de humidade das amostras.

7.6 COMPARAÇÃO COM CONTEÚDO DE HUMIDADE EM EQUILÍBRIO – E.M.C.

A madeira sendo um material higroscópico, o seu conteúdo em humidade irá alterar-se até atingir o equilíbrio com a quantidade de vapor que existe no ambiente circundante. Assim, para qualquer combinação de temperatura do ar e humidade relativa existe um conteúdo de humidade em

equilíbrio (E.M.C.) correspondente. Para o cálculo deste valor teórico, nas condições operatórias das experiências, foram utilizados os ábacos apresentados na Figura 2-9 (para pressão atmosférica) e na Figura 2-10 (para pressões superiores à pressão atmosférica). Na Figura 7-8, é comparado o valor de conteúdo de humidade final com o valor de E.M.C. calculado pelos referidos ábacos.

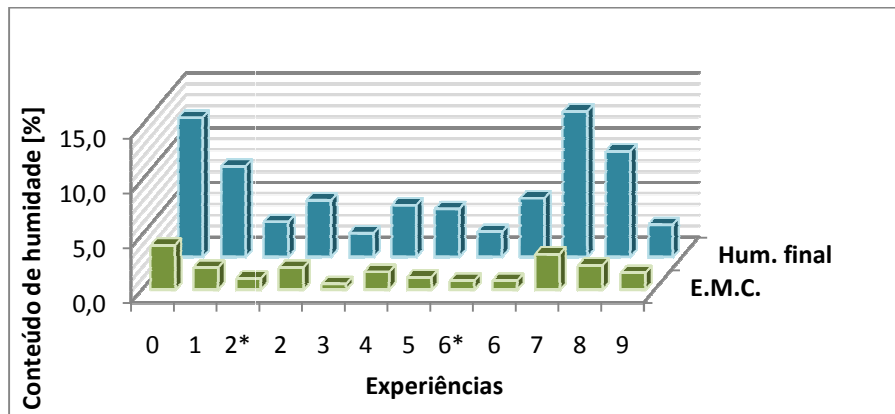


Figura 7-8: Comparação do conteúdo de humidade final com o valor de E.M.C. calculado

Analisando o gráfico obtido, observa-se que existem diferenças entre os valores de humidade final e os de E.M.C. Este facto pode ser devido a algumas razões:

- A experiência não ter durado tempo suficiente para se obter os valores de E.M.C.;
- Os ábacos contemplarem madeiras diferentes das que se usaram nesta experiência, o que pode levar a discrepâncias de valores, como refere Ahmet et al. (2000);
- Os ábacos para pressões superiores à atmosférica são efectuados para atmosferas com 100% de *steam content*, o que nas experiências realizadas não foi o obtido.
- O corte das fracções pode provocar zonas mais frágeis que, ao secar no forno para determinação da humidade final, podem quebrar e ocorrer perda de massa, afectando o valor de conteúdo de humidade calculado.



Figura 7-9: Fotografia de uma falha de corte na fracção

- O tempo em que a tábua está em contacto com o ar circundante nas diversas situações como, corte das fracções, verificação de defeitos, caracterização dimensional, etc. pode influenciar o conteúdo de humidade da madeira, conforme a humidade do ambiente circundante.

7.7 ANÁLISE QUALITATIVA DOS DEFEITOS DE SECAGEM

Na Tabela 7-1 são apresentados os defeitos obtidos em cada tábua.

Tabela 7-1: Análise qualitativa dos defeitos das tábuas

(+ - defeito presente; ++ - defeito presente de modo severo)

Exp	0	1	2*	2	3	4	5	6*	6	7	8	9
Empenamento/ torção	+ ef. taça	++		+	+ ef. taça	+ ef. taça	++		+ ef. taça	++	++	++ ef. taça
Colapso					+		+					
Defeitos nos nós												
desprendimento de nós	+			+				+				
coloração	+			+	+		+	+		+	+	+
Fendas												
expansão de fendas existentes							+			+	+	++
coloração							+			+	+	+
Coloração da tábua												
devido a condições de armazenamento	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
por oxidação					+		+			+		

Os resultados confirmam que o defeito mais comum provocado pela secagem é a torção da tábua. É verificado em algumas situações que o empenamento é severo, chegando a provocar na tábua uma forma de taça, como se pode observar nas figuras seguintes.



(tábua com torção após secagem)



(vista lateral de uma tábua que apresenta torção com efeito taça)

Figura 7-10: Torção de uma tábua após secagem

O colapso também foi verificado.



(vista lateral da fracção A1 antes da secagem)



(vista lateral da fracção A1 depois da secagem)

Figura 7-11: Colapso de uma tábua após secagem

Como se pode observar na vista lateral da fracção A1 depois da secagem, é possível verificar que a zona do cerne, constituída por células mortas e que tem uma função mais estrutural da madeira mantém a espessura, enquanto que na zona do borne, constituída por células vivas e com função de transporte da seiva, ocorre uma diminuição da espessura da tábua.

É também observado que existem alterações nos nós da tábua, nomeadamente na cor e no facto haver uma tentativa de desprendimento. A coloração dos nós pode ser devido à saída da resina na área envolvente ao nó.



Figura 7-12: Defeitos nos nós de uma tábua após secagem

Observou-se também a expansão das fendas provocadas pelo corte do pinheiro. Estas fendas, que só existiam em algumas das tábuas (porque o pinheiro ao ser cortado, lascou), depois da secagem, tornaram-se maiores sendo que algumas adquiriram coloração pelo mesmo motivo dos nós.



Figura 7-13: Fendas nas tábuas e coloração após a secagem e imagem do pinheiro lascado

A coloração que se observou na tábua proveio de 2 factores: (1) devido às condições de armazenamento, a tábua adquirir manchas e bolores, que em alguns casos, mesmo após limpeza essas manchas não foram removidas; após a secagem, observou-se que ainda se mantinham; (2) para experiências que ocorreram com velocidade de 10 m.s^{-1} , observou-se que a tábua adquiria uma coloração avermelhada; esta coloração advém da libertação de partículas resultantes da oxidação do ferro que existe dentro da estação de secagem, o que a velocidades elevadas provoca maior circulação do óxido de ferro.

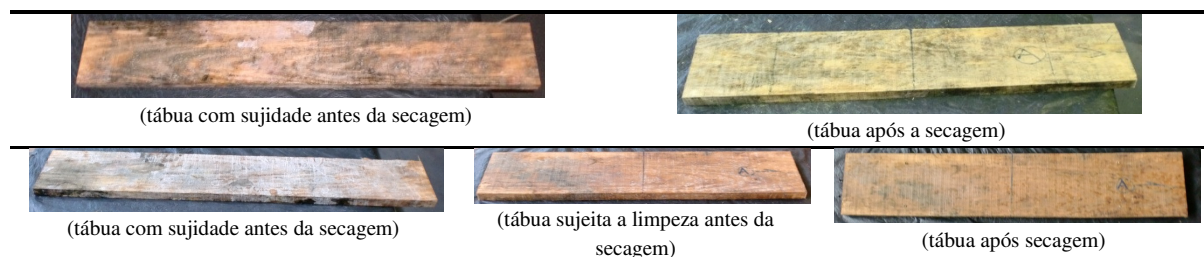


Figura 7-14: Coloração das tábuas devido às condições de armazenamento



Figura 7-15: Coloração da tábua devido à deposição de partículas resultantes da oxidação do sistema

Convém referir que é difícil avaliar se há coloração como defeito da secagem propriamente dito, uma vez que a tábua ou já entrava com manchas provocadas pelo armazenamento ou já saia suja devido à deposição de partículas resultantes da oxidação do sistema.

A maioria dos defeitos de secagem estão directamente relacionados com a localização da tábua no tronco e por conseguinte, da direcção dos veios da tábua (Lança, 2005). Neste trabalho experimental, é possível fazer algumas considerações sobre esta matéria. Nas figuras seguintes são apresentadas as montagens da localização de cada tábua que foi utilizada, no respectivo tronco de onde foi retirada.

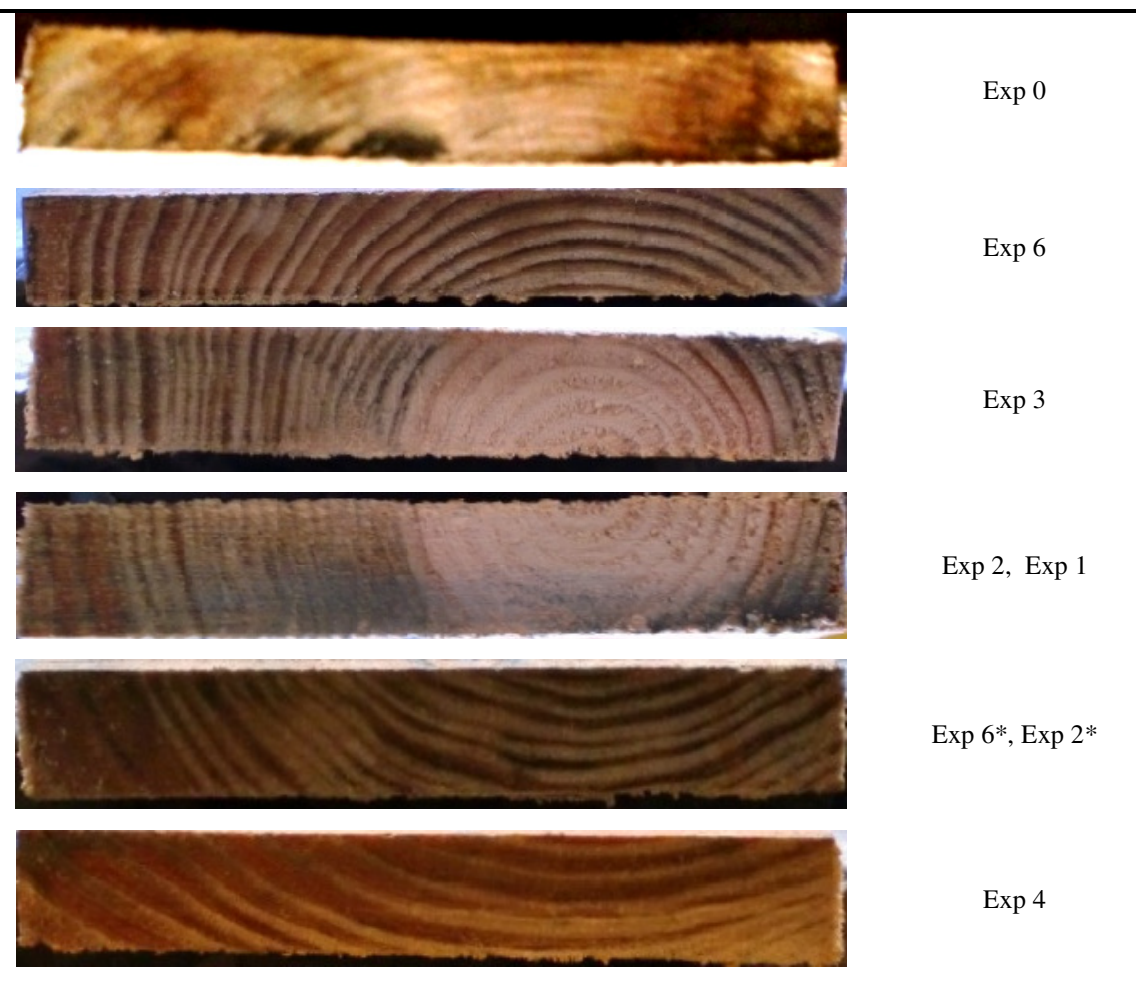


Figura 7-16: Localização de cada tábua no tronco 1

(Nota: De cada tronco (2,5 m) foi retirado 2 tábuas como por exemplo para a exp 2 e exp 1; fotos antes de secar, excepto exp 0)

- Analisando em termos de simetria da tábua:
 - Verifica-se que a experiência 4 e experiência 0 tem o mesmo defeito de torção;
 - Comparando a experiência 1 e 2 com a experiência 3 verifica-se o mesmo defeito, verificando-se contudo nesta, o efeito de taça, devido à curvatura do pinheiro que por vezes impõem diferentes zonas na mesma tábua;
 - Enquanto que nas experiências 6* e 2* (ambas sem injeção de água) não existe torção, a experiência 6 já apresenta este defeito.
- Comparando tábua com a mesma localização no tronco:
 - Comparando a experiência 2 com a experiência 1, verifica-se que esta tem maior valor de empenamento e torção do que a experiência 2.
 - Comparando as exp 6* e 2*, não apresentam torção.

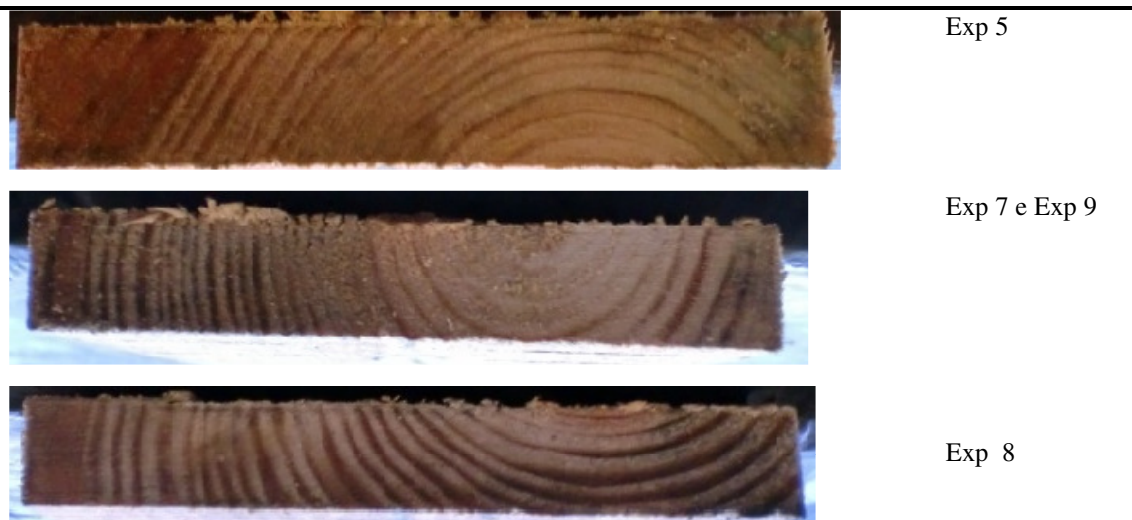


Figura 7-17: Localização de cada tábua no tronco 2

(Nota: De cada tronco (2,5 m) foi retirado 2 tábuas como por exemplo para a exp 7 e exp 9; fotos antes de secar)

Analisando a figura anterior:

- Na comparação da exp 7 com a 9, existe diferença na experiência 9 que contém defeito de torção com efeito taça.
- Foi nestas experiências que surgiu a expansão das fendas que já existiam, uma vez que ao cortar o tronco do pinheiro este lascou, provocando a abertura de pequenas fendas ao longo do tronco.

Com esta análise, conclui-se assim, que a localização da tábua no tronco e a direcção dos veios tem um papel importante na existência de alguns defeitos, o que se pode confirmar também com a Figura 2-13.

Convém referir contudo, que para analisar esta matéria, deverá ser efectuada uma análise mais exhaustiva, não só apoiada em observação visual, mas também em medições quantitativas.

7.8 CONSUMO ENERGÉTICO DO PROCESSO DE SECAGEM

Durante a realização das experiências foi monitorizado o consumo energético dispendido quer no aquecimento quer na ventilação do sistema.

Contudo, é conveniente lembrar que:

- A experiência 0, 1 e 2* ocorreram com uma potência de aproximadamente 5 kW em funcionamento, enquanto que as experiências restantes já funcionaram com 12 kW de potência no sistema; também se observou que o contador estava mal ligado, sendo os seus valores desconsiderados nas exp 0, 1 e 2*;
- Observou-se que, até à experiência 4, o contador do ventilador estava avariado, sendo os seus valores desconsiderados. Por isso, optou-se por calcular uma estimativa baseada nas experiências seguintes, para saber qual seria aproximadamente o consumo de ventilação em cada experiência (Figura 7-18).

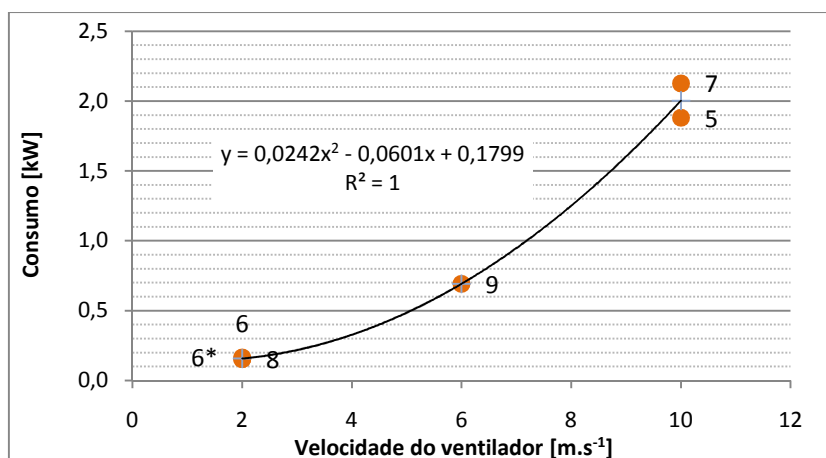


Figura 7-18: Curva para determinação do consumo do ventilador para as experiências 0 a 4

Para as experiências 1, 2*, 2, 3, e 4, consoante a sua velocidade de operação, foi calculada a média do consumo de ventilação das experiências com a mesma velocidade de operação, ou seja, por exemplo, para calcular o consumo do ventilador para a experiência 1, que opera a 2 m.s^{-1} , foi calculada a média dos consumos das experiências 6*, 6 e 8, que operam

à mesma velocidade. Para a experiência 0, como é a única experiência com velocidade de operação é 3 m.s^{-1} , optou-se por construir uma recta de regressão com as experiências e calcular a partir daí o valor do consumo do ventilador a operar a 3 m.s^{-1} .

- Também foi calculado o valor do consumo de ventilação para as experiências em que começaram a 10 m.s^{-1} e após atingirem a temperatura pretendida passaram à velocidade de operação, nomeadamente as experiências 0, 1 e 2*.

Todos estes factores tornam difícil efectuar uma análise comparativa entre experiências, que seja conclusiva. Além disso, o número reduzido de experiências efectuadas não permite uma análise estatística extensiva. Contudo, serão aqui apresentados alguns resultados e efectuadas algumas observações sobre o consumo energético neste processo.

Na Figura 7-19 são apresentados os valores do consumo das resistências e ventilador, em MJ.

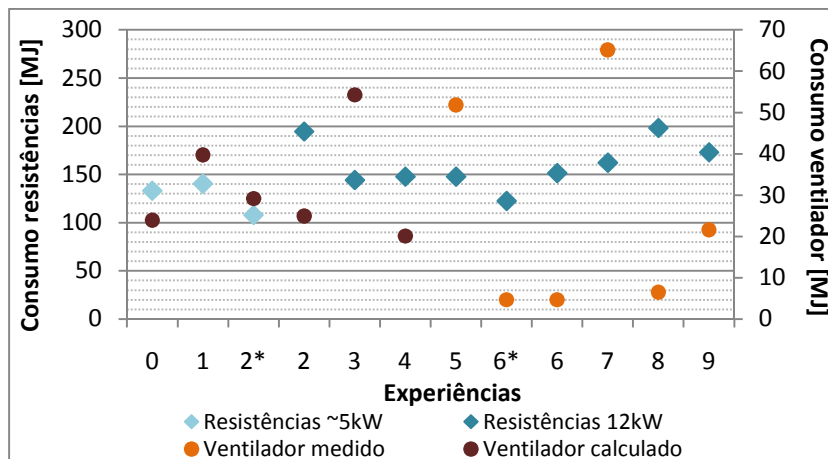


Figura 7-19: Consumo energético das resistências e ventilador durante as experiências, em MJ

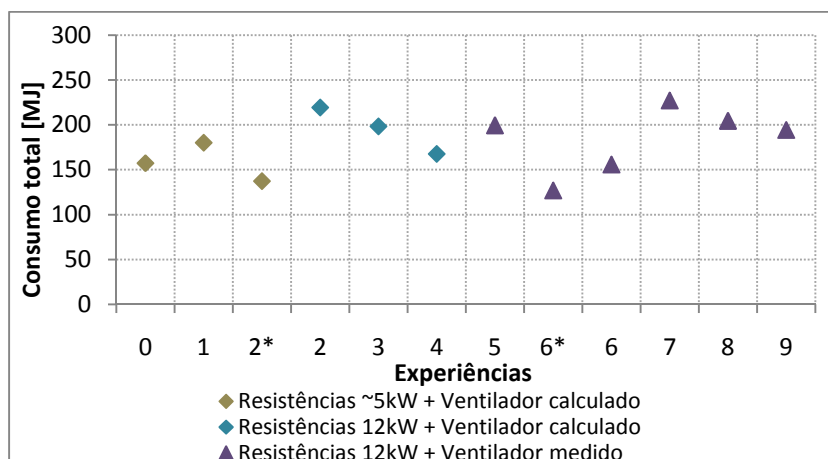


Figura 7-20: Consumo energético total do sistema, em MJ

Da análise da Figura 7-19, pode-se observar:

- Relativamente ao consumo das resistências:

- Nas experiências que ocorreram com potência de aproximadamente 5kW, é considerado que esses dados não são fiáveis uma vez que as ligações do contador das resistências estavam mal efectuadas além de ocorrerem a baixa potência. Assim, apesar de terem sido apresentados, não irão ser incluídos na análise.
- Quanto às restantes experiências, observa-se que a experiência 2 e a experiência 8 apresentam maior consumo, sendo influenciadas pelo longo tempo de secagem. A experiência 6* apresenta o menor consumo.
- Relativamente ao consumo do ventilador, observa-se que as experiências que ocorreram a 10 m.s^{-1} apresentam maior consumo de ventilação, sendo que também é possível observar que este tem também um papel muito importante no consumo total de energia, no caso da utilização de velocidades elevadas, como se pode verificar na Figura 7-20.

Nas figuras seguintes são apresentados os gráficos referentes ao consumo, em MJ.kg água removida⁻¹, ou seja, tem em conta a remoção de humidade que efectuou durante a experiência.

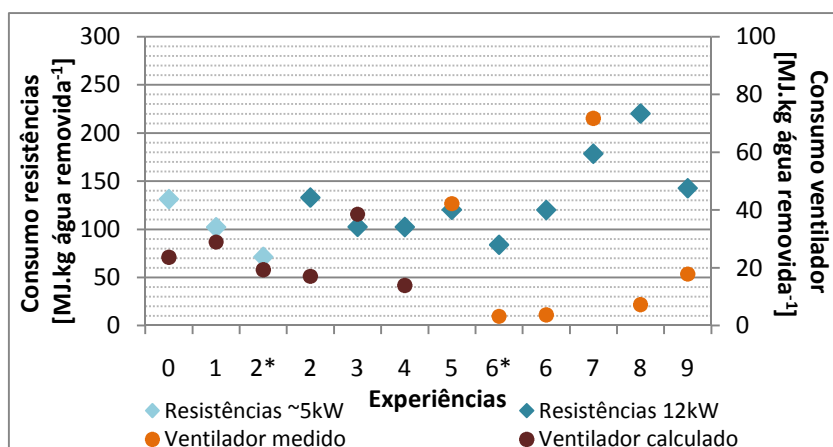


Figura 7-21: Consumo energético das resistências e ventilador durante as experiências, em MJ.kg água removida⁻¹

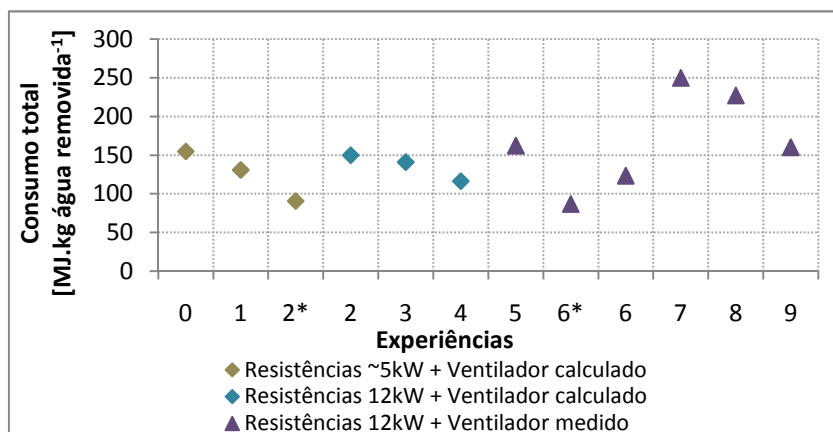


Figura 7-22: Consumo energético total do sistema, em MJ.kg água removida⁻¹

Da análise da Figura 7-21, pode-se observar:

- Relativamente ao consumo das resistências, observa-se que a experiência 8 apresenta maior consumo, devido ao facto de ter removido menor quantidade de água. A experiência 6* apresenta o menor consumo, uma vez que foi das experiências que removeu maior quantidade de água.
- Relativamente ao consumo do ventilador, observa-se que não existem grandes alterações, como se pode verificar na Figura 7-22.

Analisando agora a Figura 7-18, observa-se que quanto maior for a velocidade de operação do ventilador, maior irá ser o seu consumo. Quanto à Figura 7-23 observa-se que o consumo das resistências não depende directamente da temperatura de operação da experiência, uma vez que as diferenças entre experiências a temperatura diferente são mínimas. Ainda, analisando as experiências a 12 kW, excepto a experiência 6*, pode-se observar que as experiências a baixa velocidade (2 m.s^{-1}), experiência 6 e 8, apresentam consumos menores do que as experiências que ocorrem a 10 e 6 m.s^{-1} , o que pode indicar mais uma vez o papel importante da ventilação no consumo energético.

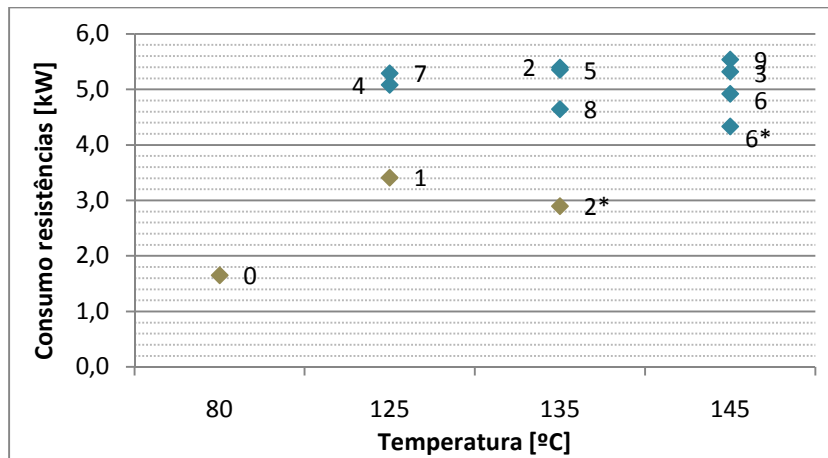


Figura 7-23: Consumo das resistências, em kW, em função da temperatura de operação

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A madeira, com a sua vasta gama de aplicações, é um material que, ao longo dos tempos tem mantido a sua importância. Por este motivo, os processos de melhoramento das suas condições de utilização são continuamente desenvolvidos e aperfeiçoados.

Este trabalho foi desenvolvido numa vertente principal: analisar o efeito das diferentes condições operatórias em vários parâmetros do processo de secagem, e para cumprir esse objectivo foram realizadas algumas experiências, com condições operatórias variáveis. As conclusões globais das experiências vão ser aqui apresentadas

8.1 CONCLUSÕES SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS

As variáveis testadas nestas experiências foram: temperatura, pressão e velocidade do fluido. Para avaliar a influência destas variáveis foi elaborado um protocolo experimental, combinando diferentes condições operatórias.

Após a realização das experiências, os resultados foram analisados e comparados entre si, concluindo-se que:

1. As dimensões da tábua sofrem alterações com o processo de secagem.

As dimensões das tábuas eram medidas antes e depois da secagem, de modo a permitir uma comparação, para perceber se existe alguma influência. Verificou-se que houve dispersão dos valores medidos que caracterizaram as dimensões da tábua, sendo que essa dispersão varia de intensidade consoante a dimensão, ou seja, observou-se que o comprimento da tábua tem uma variação inferior a 1%, seguido pela largura e pela espessura, que apresenta a maior dispersão de valores de dimensões. Contudo, não parece haver nenhuma relação específica da maior ou menor variabilidade de dimensões com as condições operatórias aplicadas a cada experiência, exceptuando na comparação com a secagem convencional, que apresenta menores valores. Este facto leva a concluir que as diferenças dimensionais podem também ser provocadas por outros factores, tais como, direcção dos veios das tábuas e conteúdo de humidade da tábua, uma vez que a madeira é um material higroscópico.

2. O conteúdo de humidade inicial não apresenta nenhuma relação com o tempo de secagem.

Analisando o tempo de cada experiência, não se verificou se o maior ou menor teor de humidade está directamente relacionado com o tempo de secagem.

3. O processo de secagem é influenciado pela diferença entre a temperatura de bolbo seco e temperatura de bolbo húmido.

De facto, quanto maior for a diferença entre a temperatura de bolbo seco e a temperatura de bolbo húmido, maior será a quantidade de água removida, o que implica a obtenção de menores humidades finais na tábua.

4. A taxa de secagem é influenciada directamente pelas condições operatórias do processo de secagem.

A taxa de secagem aumenta com: a) o aumento da temperatura, b) a diminuição da pressão, c) o aumento da velocidade do fluído de secagem, d) a diminuição do *steam content*. O aumento da temperatura cria um gradiente que favorece a remoção da humidade da tábua. Já quanto à pressão, quanto mais elevada for, maior será a temperatura de bolbo húmido, o que diminui a diferença entre a temperatura de bolbo seco e temperatura de bolbo húmido, diminuindo a taxa de evaporação da humidade, o que implica que em sistema pressurizados seja recomendado operar a temperaturas de bolbo seco elevadas. O aumento da velocidade de ventilação é um factor muito importante até se atingir o PSF, pois favorece a remoção da humidade livre mais rapidamente, o que irá aumentar a taxa de secagem. Quanto maior for o *steam content*, menos capacidade o ar terá de remover a humidade na forma de vapor, provocando a diminuição da taxa de secagem. Também se observou que se a fase de aquecimento for lenta, a taxa de secagem apresenta uma fase de taxa constante.

5. Verificou-se uma relação entre o tempo de secagem e as condições operatórias de cada experiência.

Observa-se que o tempo de cada experiência varia de acordo com as condições operatórias, ou seja, verificou-se que o tempo de secagem diminui com a) o aumento da temperatura, b) a diminuição da pressão (neste caso os valores não foram muito conclusivos) e c) a diminuição da velocidade do fluído de secagem.

6. A injeção de água tem influência na humidade final da tábua.

Observou-se que a injeção de água na câmara de secagem provocou um aumento nos valores de humidade final da tábua, na medida em que aumenta a quantidade de água agregada ao ar, tornando mais difícil a sua função de remoção da humidade da tábua. Também se verificou que a proximidade ao local de injeção afectou em grande escala o teor de humidade dessa parte da tábua.

7. O valor teórico de E.M.C. não foi atingido em todas as experiências.

Os valores teóricos de E.M.C. não foram obtidos nas experiências realizadas. As possíveis explicações para este facto residem principalmente na dúvida sobre a duração das experiências, se terá sido suficiente ou não e também na aplicabilidade dos valores dos ábacos para este tipo de madeira, além de que estes são elaborados para atmosferas de 100% de vapor, o que nestes casos não se verificava.

Outro dos objectivos era analisar qualitativamente os defeitos das tábuas observados após o processo de secagem. Observou-se que o defeito mais comum era a torção. Este defeito não parece ter a influência das condições operatórias mas da direcção dos veios da tábua e do local do tronco de onde a tábua tinha sido retirada. Observou-se também a abertura de fendas existentes, colapso, defeitos nos nós e coloração da tábua assim como a importância das condições de armazenamento da tábua. É aconselhado, para se obter resultados mais conclusivos, que se realize um estudo mais aprofundado, tendo em consideração a direcção dos veios da madeira.

Acerca do consumo energético das experiências, observou-se que existe uma relação clara entre o consumo do ventilador e a velocidade de ventilação (quanto maior a velocidade de ventilação, maior será o consumo). Contudo, curiosamente, já não se verifica uma relação entre o consumo das resistências e a temperatura de operação. De facto existe uma pequena variação mas é influenciada pela velocidade de ventilação das experiências, que ao diminuir, irá remover menor quantidade de humidade, fazendo com que o ar arrefeça mais lentamente. É de referir que a ventilação a velocidades elevadas, representa uma boa parte do consumo energético total.

8.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO E SUGESTÕES PARA UM TRABALHO FUTURO

Ao longo do trabalho e da realização das experiências foi-se apercebendo que existiam certas alterações que se poderiam implementar numa estratégia de melhoramento do processo:

- Variar a quantidade de água injectada conforme as condições operatórias;
- Construção de apoios/encaixes da tábua mais eficientes de modo a que não existam reacções na célula de carga provocadas pela ventilação;
- Construção de um anteparo para dispersar o escoamento junto à extremidade da tábua para que esta não esteja em contacto directo com o início do escoamento;
- Afastar a tábua do local de injeção de água.

Como sugestão para um trabalho futuro sugere-se a realização de experiências com outras condições operatórias e diferentes tipos de madeira.

Referências bibliográficas

- Adesanya, B.A., Beard, J.N., Nanda, A.K., 1986. Moisture during high temperature drying of yellow poplar. Drying vol. 1, pp 375-381. Proceedings of the fifth international symposium on drying held on the campus of the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Ahmet, K., Dai, G., Tomlin, R., Kaczmar, P., Riddiough, 2000. The equilibrium moisture content of common U.K. species at three conditions of temperature and relative humidity. Solid wood products, pp 64-68.
- Ananias, R.A., Salvo, L., Estrada, R., Briones, R., 2008. Estudio Experimental del secado a temperaturas convencionales de acacias. Maderas. Ciencia y tecnología vol 10(2), pp 151-162.
- Babío, A., 2006. Industria de aserrío en la provincia de A Coruña. Tesis doctoral. USC. (Referido em www.atlanwood.org/manual.php)
- Basilico, C., Genevaux, J.M., Martin, M., 1988. High temperature drying of wood semi-industrial kiln experiments. Sixth international drying symposium IDS'88. Versailles. France.
- Boone, R.S., 1984. *High-temperature kiln-drying of 4/4 lumber from 12 hardwood species*. Forest prod. J. vol 34(3), pp 10 – 18.
- Brown, W.H., 1988. The conversion and seasoning of wood. Stobart & Son Ltd. London
- Castela, A.A.O., 2009. *Aplicação do método de Taguchi no desenvolvimento de vidrados corados*. Tese de mestrado em Engenharia Cerâmica e do Vidro. Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro. Universidade de Aveiro.
- CELPA, 2009. Boletim Estatístico da CELPA 2009. Industria papelreira portuguesa. http://www.celipa.pt/images/pdf/art209_pt_be_2009.pdf – Data de consulta: 2 de Outubro de 2010.
- Çengel, Y.A., Boles, M.A., 2006. Termodinâmica. 5 ed., McGrawHill Interamericana do Brasil, pp 682-685.
- Center for Taguchi methods, 1987. Introduction to quality engineering – Course manual. American Supplier Institute, Incorporated.
- Costa, A., 2006. Secagem da madeira. Departamento de Engenharia Florestal. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. http://www.efl.unb.br/arq_de_texto/prof_alexandre/als_secagem.pdf – Data de consulta: 30 de Março de 2010
- Coutinho, J.S., 1999. Madeiras. Materiais de construção 1. <http://paginas.fe.up.pt/~jcouti/Madeiras%2009.pdf> – Data de consulta: 7 de Abril de 2010
- Desch, H.E., Dinwoodie, J.M., 1981. Timber: its structure, properties and utilisation. 6th edition. MacMillan.
- Dinwoodie, J.M., 1981. Timber – its nature and behaviour. Van Nostrand Reinhold Company
- LNEC., 1955. Terminologia de Madeira. Documentação normativa. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa. (Referido em Coutinho, 1999)

- Fung, P. Y., 1976. High temperature drying of Australian hardwoods. Australian forest industries journal, Abril, pp 46 – 50.
- Galvão, A.P.M, Jankowsky, I.P., 1985. Secagem racional de Madeira. São Paulo: Nobel, pp 111 (referido em Martins et al., 2009)
- Jankowsky, I.P., 1995. Equipamentos e processos para a secagem de madeiras. Seminário internacional de utilização da Madeira de eucalipto para serraria. São Paulo. Anais. Piracicaba: IPEF, pp 109-118. (referido em Santos et al., 2003)
- Kauman, W.G., 1956. Equilibrium Moisture content relations and drying control in superheated steam drying. Forest products journal, September, pp 328-332.
- Keylwerth, R., 1952. Der Verlauf der Holz-temperatur Während der Furnier-und Schnittholztrocknung. Holz als Roh-und Werkstoff, vol 10(3), pp 87-91. (referido em Santini & Tomaselli, 2001)
- Kimball, K.E., Lowery, D.P., 1967. High temperature and conventional temperature – Methods for drying Lodgepole pine and Western Larch Studs. Forest Product Journal, vol. 17(4), pp 32-40.
- Klitzke, R.J., 2009. Curso de secagem de Madeira. Universidade Federal do Paraná. Brasil. Consultado em 30 de Março de 2010, <http://www.madeira.ufpr.br/graduacao/secagemmadeira.pdf>
- Kollmann, F.F.P., 1961. High temperature drying – research, application and experience in Germany. Forest products journal, November, pp 508-515.
- Kollmann, F.F.P., Cotê, W.A., 1968. Principles of wood science and technology. Berlin: Springer-Verlag, vol. 1, 592 pp. (referido em Santos et al., 2003)
- Lança, P., 2005. Materiais de construção – Introdução às madeiras – Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja. Consultado em 7 de Abril de 2010, http://www.estig.ipbeja.pt/~pdnl/Sub-paginas/MatConst_apoio_files/ppt/Madeiras_propriedades.pdf
- Martins, J.G., Araújo, J., 2005. Madeiras – Materiais de construção. <http://www2.ufp.pt/~jguerra/PDF/Materiais/Madeiras.pdf> – Data de consulta: 23 de Fevereiro de 2010
- Martins, J.G., Vieira, A., 2004. Materiais de construção – Derivados de madeira. Série materiais. 1ª edição. <http://www2.ufp.pt/~jguerra/PDF/Materiais/Derivados%20de%20Madeira.pdf> – Data de consulta: 7 de Abril de 2010
- Martins, M.F., Oliveira, L.S., Coelho, B.S., Pereira, M.L., 2009. Taxa de secagem de madeira de Pinus elliottii engelm. de diferentes espessuras. XVIII CIC. XI ENPOS. http://www.ufpel.edu.br/cic/2009/cd/pdf/EN/EN_00378.pdf. – Data da consulta: 21 de Setembro de 2010.
- Norte, R., 2010. Secagem pressurizada a alta temperatura – Controlo e monitorização do processo. Relatório interno. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Aveiro.

- Noves, H.A., Seco, I.I.F.-G., 1994. Practical evaluation and operation of superheated steam drying process with different softwoods and hardwoods. *Holz als Roh- und Werkstoff* vol. 52, pp 135-138.
- Oliveira, J.M., 2005. Madeira e Água. Escola Superior de Tecnologia de Viseu. Instituto politécnico de Viseu. <http://www.estv.ipv.pt/paginaspessoais/jqomarcelo/Tim3/Madeira%20e%20Agua.pdf> – Data de consulta: 30 de Março de 2010
- Pang, S., Pearson, H., 2002. Experimental Investigation and Practical Application of Superheated Steam Drying Technology for Softwood Timber. *Drying Technology*, vol. 22(9), pp 2079 – 2094.
- Panow, S.; Nester, M. R., 1984. Some moisture content/temperature/time relationships for individual timber specimens during high temperature drying. Queensland Dept. of Forestry Res. Note 39 (referido por Noves & Seco, 1994)
- Panow, S.; Nester, M. R., 1985. Drying end point determination during high-temperature drying. *Forest Products Journal* vol 35(1), pp 51-55 (referido por Noves & Seco, 1994)
- Pratt, G.H., 1974. Timber Drying Manual. Princes Risborough Laboratory, 2ª edição, Buckinghamshire.
- Rosen, H.N., 1983. Recent advances in the theory of drying lumber. IUFRO division V conference. Madison. Proceedings: wood drying working party. Carbondale: Southern Illinois University, USDA, pp 32-62. (referido em Santos et al, 2003)
- Rosen H.N., Bodkin, R.E., Gaddis, K.D., 1983. Pressure steam drying of lumber. *Forest Products Journal*, vol.33(1), pp 17-24.
- Rosen, H.N., 1981. Drying processes for the year 2000. Proceedings of the XVII IUFRO World Congress, Japan, Div. 5, pp 183-196. (referido por Silva, 1992).
- Ross, P.J., 1991. Aplicações da técnica Taguchi na Engenharia da qualidade. McGraw Hill, Makron Books, Brasil.
- Santini, E.J., Tomaselli, I., 2001. Control of the drying process through the relationship of wood and wet-bulb temperatures. *Drying Technology*, vol 19(1), pp 127-135.
- Santos, G.R.V., Jankowsky, I.P., Andrade, A., 2003. Characteristic drying curve for *Eucalyptus grandis* lumber. *Scientia forestalis*, n. 63, pp 214-220.
- Silva, F.J.N., 1992. High Temperature, Pressurized Wood Drying: Experimental And Simulation Studies. PhD Thesis. School of Mechanical Engineering, Department of Applied Energy.
- Simpson, I., 1985. Why High Temperature Dry? Paper presented to the high temperature drying workshop 5th – 7th August 1985
- Simpson, W.T., Tschernitz, J.L., 1998. Effect of thickness variation on warp in high – temperature drying plantation – grown loblolly pine 2 by 4's. *Wood and fiber science*, vol. 30(2), pp 165 – 174.

- Tarmian, A., Sepeher, A., Rahimi, S., 2009. Drying Stress and Strain in Tension Wood: A Conventional Kiln Schedule to Efficiently Dry Mixed Tension/Normal Wood Boards in Poplar. *Drying Technology*, vol. 27(10), pp 1033 – 1040.
- Taylor, F.W., 1982. A comparison of energy requirements for kiln-drying southern pine at different drying temperatures. *Wood and Fiber*, vol 14(4), pp 246-253. (referido por Silva, 1992).
- Uriartt, A.A., 1992. A madeira como material de construção. *Materiais de construção 2*, cap 17. LA Falcão Bauer – Livros técnicos e Científicos Editora, 4ª Edição, Rio de Janeiro, Brasil. (referido em Coutinho, 1999)
- Villière, A., 1953. Nouvelles techniques de sechage artificiel: sechage a haute temperature. Sechage par centrifugation. *Revue internationale du Bois*, 214, pp 195-197 (referido por Silva, 1992).
- Wengert, E.M., 1979. Lumber Predrying: a Timely Examination. *Timber Process Ind.*, vol. 4(9), pp 20-24. (referido por Silva, 1992).

Bibliografia electrónica:

- www.trada.co.uk – TRADA, 1988 (referido por Silva, 1992)
- <http://www.embar.pt/conteudos/File/Noticias/2008/232%20Perguntas%20e%20respostas%20nemtodo.pdf> – Data de consulta: 2 de Abril de 2010.
- http://images.google.pt/imgres?imgurl=http://c3.quickcachr.fotos.sapo.pt/i/n9f0117ca/5426725_bEnW4.jpeg&imgrefurl=http://parrozelos.blogs.sapo.pt/9993.html&usq=_4Q2DFhpbuHM9cE1icmcyAKBjOQU=&h=326&w=303&sz=23&hl=pt-PT&start=12&um=1&itbs=1&tbnid=uiVLkMIkDK6-MM:&tbnh=118&tbnw=110&prev=/images%3Fq%3Dnem%25C3%25A1todo%2Bdo%2Bpinheiro%26um%3D1%26hl%3Dpt-PT%26sa%3DN%26tbs%3Disch:1 – Data de consulta: 6 de Abril de 2010.
- http://portal.min-agricultura.pt/portal/page/portal/MADRP/PT/foco/nematodo/legisl_nematodo – Data de consulta: 15 de Março de 2010
- http://www.ipq.pt/backfiles/prNP004487_2008.pdf – Data de consulta: 15 de Março
- <http://www2.ufp.pt/~jguerra/PDF/Materiais/Derivados%20de%20Madeira.pdf> – Data de consulta: 29 de Março de 2010

ANEXO A – DADOS DE CONDIÇÕES OPERATÓRIAS APLICADAS À SECAGEM DE MADEIRA

Condições operatórias									
Tipo de secagem	Câmara de secagem	Produto	Humidade inicial	Pressão	Temperatura	Velocidade do fluido	Tempo de secagem	Humidade final	Referência
Secagem pressurizada com vapor	cilindrico (2.5m*1 mØ)	Pinho (2100*152*38 mm)		Até 3 bar	Até 130°C	Até 10 m.s ⁻¹			Vermaas & Kuun (1989)
Secagem pressurizada com vapor		Tábuas de pinho (100*40*3000 mm); (100*40*1500 mm)		3 bar	160°C	10 m.s ⁻¹	9.2 horas (pré-aquecimento 1.5 horas)	10%	Pang, S., Pearson, H. (2004)
Secagem com vapor a pressão atmosférica	151*80*80 cm	Vários tipos de madeira	Consoante o tipo de madeira	1 atm	120°C	Até 5 m.s ⁻¹	Consoante o tipo de madeira	Objectivo 10%	Noves, H., Seco, J. (1994)
Secagem com vapor a pressão atmosférica		Pinho (100*50*600 mm)		1 atm	120°C, 140°C, 170°C, 190°C	6.5 m.s ⁻¹			Pang, S. (1997)
Secagem com vapor a pressão atmosférica	Túnel de vento (0,25*0,25*1,20 m)	Tábuas de madeira (abeto branco, faia) (1*0,180*0.027 m)		1 atm	Entre 150°C e 180°C	Entre 6 e 18 m.s ⁻¹			Moyne, C., Basilico, C. (1985)

Condições operatórias									
Tipo de secagem	Câmara de secagem	Produto	Humidade inicial	Pressão	Temperatura	Velocidade do fluido	Tempo de secagem	Humidade final	Referência
Secagem pressurizada de madeira a vapor	cilindrico (3.05m*0.76 mØ)	Tábuas de madeira (Choupo, Bétula, Carvalho silvestre, Carvalho vermelho, Nogueira negra, Fraxinus americana L.) Comprimento 2.13 e 2.44 m		1.1 bar a 2.07 bar	116°C a 138°C	1.27 m.s ⁻¹	24 a 48 horas	Objectivo 6%	Rosen, et al, (1983)
Secagem a alta temperatura	15.85*9.45*5m	Pinheiro, Cedro	59%,53%	1 atm	116°C		Aproximado 24 horas	13%	Kimball, Lowery, (1967)
Secagem a alta temperatura		Eucalipto alpino, negro e de montanha	30-40%/ 100-160%/ 30%	1 atm	180, 150, 130°C/ 130, 180°C/ 130°C	10 m.s ⁻¹	1.5, 2, 2.5 horas/ 12, 4 horas/ 2 horas	10%/ 10%/ 15%	Fung, (1976)
Secagem a elevada temperatura e secagem	Cilíndrico	1*0.15*0.025 m		1, 1.5, 2 e 2.5 atm	130, 135 e 150°C	0.5 a 5 m.s ⁻¹	5.73 a 20.65 horas	1.3 a 8%	Norton, Silva, (1980)

Tabela Anexo A - 1: Dados bibliográficos sobre a secagem de madeira

ANEXO B – TABELA TERMODINÂMICA DE VAPOR

Saturated water—Temperature table

Temp., T °C	Sat. press., P _{sat} kPa	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg		Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
		Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Sat. vapor, s _g
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164
35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845
45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261
50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234
60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004
75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369
85	57.83	0.001033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102
90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866
95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659
	Sat. press., MPa										
100	0.10135	0.001044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480
105	0.12082	0.001048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328
110	0.14327	0.001052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202
115	0.16906	0.001056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100
120	0.19853	0.001060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020
125	0.2321	0.001065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962
130	0.2701	0.001070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925
135	0.3130	0.001075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907
140	0.3613	0.001080	0.5089	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908
145	0.4154	0.001085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926
150	0.4758	0.001091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960
155	0.5431	0.001096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010
160	0.6178	0.001102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075
165	0.7005	0.001108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153
170	0.7917	0.001114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244
175	0.8920	0.001121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2032.4	2773.6	2.0909	4.5347
180	1.0021	0.001127	0.19405	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461
185	1.1227	0.001134	0.17409	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586
190	1.2544	0.001141	0.15654	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720
195	1.3978	0.001149	0.14105	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2835	4.1863

Saturated water—Temperature table (Concluded)

Temp., T °C	Sat. press., P _{sat} MPa	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg		Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
		Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Sat. vapor, s _g
200	1.5538	0.001157	0.12736	850.65	1744.7	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	4.1014
205	1.7230	0.001164	0.11521	873.04	1724.5	2597.5	875.04	1921.0	2796.0	2.3780	4.0172
210	1.9062	0.001173	0.10441	895.53	1703.9	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	3.9337
215	2.104	0.001181	0.09479	918.14	1682.9	2601.1	920.62	1879.9	2800.5	2.4714	3.8507
220	2.318	0.001190	0.08619	940.87	1661.5	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	3.7683
225	2.548	0.001199	0.07849	963.73	1639.6	2603.3	966.78	1836.5	2803.3	2.5639	3.6863
230	2.795	0.001209	0.07158	986.74	1617.2	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	3.6047
235	3.060	0.001219	0.06537	1009.89	1594.2	2604.1	1013.62	1790.5	2804.2	2.6558	3.5233
240	3.344	0.001229	0.05976	1033.21	1570.8	2604.0	1037.32	1766.5	2803.8	2.7015	3.4422
245	3.648	0.001240	0.05471	1056.71	1546.7	2603.4	1061.23	1741.7	2803.0	2.7472	3.3612
250	3.973	0.001251	0.05013	1080.39	1522.0	2602.4	1085.36	1716.2	2801.5	2.7927	3.2802
255	4.319	0.001263	0.04598	1104.28	1596.7	2600.9	1109.73	1689.8	2799.5	2.8383	3.1992
260	4.688	0.001276	0.04221	1128.39	1470.6	2599.0	1134.37	1662.5	2796.9	2.8838	3.1181
265	5.081	0.001289	0.03877	1152.74	1443.9	2596.6	1159.28	1634.4	2793.6	2.9294	3.0368
270	5.499	0.001302	0.03564	1177.36	1416.3	2593.7	1184.51	1605.2	2789.7	2.9751	2.9551
275	5.942	0.001317	0.03279	1202.25	1387.9	2590.2	1210.07	1574.9	2785.0	3.0208	2.8730
280	6.412	0.001332	0.03017	1227.46	1358.7	2586.1	1235.99	1543.6	2779.6	3.0668	2.7903
285	6.909	0.001348	0.02777	1253.00	1328.4	2581.4	1262.31	1511.0	2773.3	3.1130	2.7070
290	7.436	0.001366	0.02557	1278.92	1297.1	2576.0	1289.07	1477.1	2766.2	3.1594	2.6227
295	7.993	0.001384	0.02354	1305.2	1264.7	2569.9	1316.3	1441.8	2758.1	3.2062	2.5375
300	8.581	0.001404	0.02167	1332.0	1231.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	2.4511
305	9.202	0.001425	0.019948	1359.3	1195.9	2555.2	1372.4	1366.4	2738.7	3.3010	2.3633
310	9.856	0.001447	0.018350	1387.1	1159.4	2546.4	1401.3	1326.0	2727.3	3.3493	2.2737
315	10.547	0.001472	0.016867	1415.5	1121.1	2536.6	1431.0	1283.5	2714.5	3.3982	2.1821
320	11.274	0.001499	0.015488	1444.6	1080.9	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	2.0882
330	12.845	0.001561	0.012996	1505.3	993.7	2498.9	1525.3	1140.6	2665.9	3.5507	1.8909
340	14.586	0.001638	0.010797	1570.3	894.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	1.6733
350	16.513	0.001740	0.008813	1641.9	776.6	2418.4	1670.6	893.4	2563.9	3.7777	1.4335
360	18.651	0.001893	0.006945	1725.2	626.3	2351.5	1760.5	720.3	2481.0	3.9147	1.1379
370	21.03	0.002213	0.004925	1844.0	384.5	2228.5	1890.5	441.6	2332.1	4.1106	0.6865
374.14	22.09	0.003155	0.003155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0

Source: Tables A-4 through A-8 are adapted from Gordon J. Van Wylen and Richard E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, English/SI Version, 3rd ed. (New York: John Wiley & Sons, 1986), pp. 635-651. Originally published in Joseph H. Keenan, Frederick G. Keyes, Philip G. Hill, and Joan G. Moore, *Steam Tables*, SI Units (New York: John Wiley & Sons, 1978).

Tabela Anexo B - 1: Tabela termodinâmica de vapor saturado – tabela de temperatura

(extraído de: Çengel & Boles, 2006)

Saturated water—Pressure table

Press., P kPa	Sat. temp., T _{sat} °C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
		Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}	Sat. vapor, s _g
0.6113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	6.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	5.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
Press., MPa												
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.28	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2404	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	780.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2871.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2787.6	2.2515	4.2438	6.4953

Saturated water—Pressure table (Concluded)

Press., P MPa	Sat. temp., T _{sat} °C	Specific volume, m ³ /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
		Sat. liquid, v _f	Sat. vapor, v _g	Sat. liquid, u _f	Evap., u _{fg}	Sat. vapor, u _g	Sat. liquid, h _f	Evap., h _{fg}	Sat. vapor, h _g	Sat. liquid, s _f	Evap., s _{fg}	Sat. vapor, s _g
1.40	195.07	0.001149	0.14084	828.70	1764.1	2592.8	830.30	1957.7	2790.0	2.2842	4.1850	6.4693
1.50	198.32	0.001154	0.13177	843.16	1751.3	2594.5	844.89	1947.3	2792.2	2.3150	4.1298	6.4448
1.75	205.76	0.001166	0.11349	876.46	1721.4	2597.8	878.50	1917.9	2796.4	2.3851	4.0044	6.3896
2.00	212.42	0.001177	0.09963	906.44	1693.8	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	3.8935	6.3409
2.25	218.45	0.001187	0.08875	933.83	1668.2	2602.0	936.49	1865.2	2801.7	2.5035	3.7937	6.2972
2.5	223.99	0.001197	0.07998	959.11	1644.0	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	3.7028	6.2575
3.0	233.90	0.001217	0.06668	1004.78	1599.3	2604.1	1008.42	1795.7	2804.2	2.6457	3.5412	6.1869
3.5	242.60	0.001235	0.05707	1045.43	1558.3	2603.7	1049.75	1753.7	2803.4	2.7253	3.4000	6.1253
4	250.40	0.001252	0.04978	1082.31	1520.0	2602.3	1087.31	1714.1	2801.4	2.7964	3.2737	6.0701
5	263.99	0.001286	0.03944	1147.81	1449.3	2597.1	1154.23	1640.1	2794.3	2.9202	3.0532	5.9734
6	275.64	0.001319	0.03244	1205.44	1384.3	2589.7	1213.35	1571.0	2784.3	3.0267	2.8625	5.8892
7	285.88	0.001351	0.02737	1257.55	1323.0	2580.5	1267.00	1505.1	2772.1	3.1211	2.6922	5.8133
8	295.06	0.001384	0.02352	1305.57	1264.2	2569.8	1316.64	1441.3	2758.0	3.2068	2.5364	5.7432
9	303.40	0.001418	0.02048	1350.51	1207.3	2557.8	1363.26	1378.9	2742.1	3.2858	2.3915	5.6722
10	311.06	0.001452	0.018026	1393.04	1151.4	2544.4	1407.56	1317.1	2724.7	3.3596	2.2544	5.6141
11	318.15	0.001489	0.015987	1433.7	1096.0	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	2.1233	5.5527
12	324.75	0.001527	0.014263	1473.0	1040.7	2513.7	1491.3	1193.3	2684.9	3.4962	1.9962	5.4924
13	330.93	0.001567	0.012780	1511.1	985.0	2496.1	1531.5	1130.7	2662.2	3.5606	1.8718	5.4323
14	336.75	0.001611	0.011485	1548.6	928.2	2476.8	1571.1	1066.5	2637.6	3.6232	1.7485	5.3717
15	342.24	0.001658	0.010337	1585.6	869.8	2455.5	1610.5	1000.0	2610.5	3.6848	1.6249	5.3098
16	347.44	0.001711	0.009306	1622.7	809.0	2431.7	1650.1	930.6	2580.6	3.7461	1.4994	5.2455
17	352.37	0.001770	0.008364	1660.2	744.8	2405.0	1690.3	856.9	2547.2	3.8079	1.3698	5.1777
18	357.06	0.001840	0.007489	1698.9	675.4	2374.3	1732.0	777.1	2509.1	3.8715	1.2329	5.1044
19	361.54	0.001924	0.006657	1739.9	598.1	2338.1	1776.5	688.0	2464.5	3.9388	1.0839	5.0228
20	365.81	0.002036	0.005834	1785.6	507.5	2293.0	1826.3	583.4	2409.7	4.0139	0.9130	4.9269
21	369.89	0.002207	0.004952	1842.1	388.5	2230.6	1888.4	446.2	2334.6	4.1075	0.6938	4.8013
22	373.80	0.002742	0.003568	1961.9	125.2	2087.1	2022.2	143.4	2165.6	4.3110	0.2216	4.5327
22.09	374.14	0.003155	0.003155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Tabela Anexo B - 2: Tabela termodinâmica de vapor saturado – tabela de pressão

(extraído de: Çengel & Boles, 2006)

ANEXO C – TABELAS-RESUMO RELATIVAS ÀS EXPERIÊNCIAS

Dados	Experiências											
	0	1	2*	2	3	4	5	6*	6	7	8	9
Temperatura de bolbo seco (°C)	80	125	135	135	145	125	135	145	145	125	135	145
Pressão (bar)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0
Conteúdo de humidade inicial (% bs)	97,12	87,13	89,92	95,24	93,64	99,51	87,45	104,78	98,94	77,55	90,55	90,77
Desvio padrão	8,05	6,16	3,05	7,14	14,40	2,26	15,09	4,90	7,67	10,33	12,03	2,07
Conteúdo de humidade final (% bs)	12,68	8,23	3,18	5,15	2,14	4,69	4,35	2,26	5,34	13,27	9,62	2,89
Desvio padrão	1,70	2,67	0,58	6,25	0,43	1,12	0,97	1,10	6,46	2,35	7,72	1,15
Tempo de secagem (h)	22,43	11,43	10,36	10,01	7,52	8,07	7,66	7,85	8,54	8,51	11,84	8,67
Velocidade do fluido de secagem (m.s ⁻¹)	3	2	6	6	10	6	10	2	2	10	2	6
Humidade esperada (humidade de equilíbrio) (% bs)	4,0	2,0	1,0	2,0	0,5	1,6	1,1	0,8	0,8	3,2	2,2	1,5
Consumo energético (aquecimento) (MJ)	133,2	140,4	108,0	194,4	144,0	147,6	147,6	122,4	151,2	162,0	198,0	172,8
Consumo energético (ventilação) (MJ)	-	-	-	-	-	-	51,84	4,68	4,68	65,16	6,48	21,60
Consumo energético (total) (MJ)	133,2	140,4	108,0	194,4	144,0	147,6	199,4	127,08	155,88	227,2	204,5	194,4

Tabela Anexo C - 1: Resumo das condições operatórias e valores obtidos em cada experiência

Limpeza da tábua	
Exp 0	Tábua por limpar
Exp 1	Tábua por limpar
Exp 2*	Tábua por limpar
Exp 2	Tábua por limpar
Exp 3	Tábua por limpar
Exp 4	Tábua limpa
Exp 5	Tábua limpa
Exp 6*	Tábua limpa
Exp 6	Tábua limpa
Exp 7	Tábua limpa
Exp 8	Tábua limpa
Exp 9	Tábua limpa

Tabela Anexo C - 2: Limpeza das tábuas por experiência

Injecção de água		Gráfico de injecção de água
Tempo de injecção	Intervalo de injecção	
Exp 0	Sem injecção	
Exp 1	1 seg	180 seg
		Sem gráfico (problema de armazenamento de dados no <i>software</i>)
Exp 2*	Sem injecção (não atingiu a temperatura)	
Exp 2	1 seg	180 seg
		Sem gráfico (problema de armazenamento de dados no <i>software</i>)
Exp 3	1 seg	180 seg
		Sem gráfico (problema de armazenamento de dados no <i>software</i>)
Exp 4	1 seg	180 seg
Exp 5	1 seg	180 seg
		Com gráfico
Exp 6*	Sem injecção	
Exp 6	1 seg	180 seg
Exp 7	3 seg	180 seg
Exp 8	3 seg	180 seg
Exp 9	3 seg	180 seg
		Com gráfico

Tabela Anexo C - 3: Dados de injecção de água por experiência

	Potência eléctrica instalada Resistências [kW]	Funcionamento do contador do ventilador	Funcionamento do contador das resistências
Exp 0	5	Contador avariado	Contador avariado
Exp 1	5	Contador avariado	Contador avariado
Exp 2*	5	Contador avariado	Contador avariado
Exp 2	12	Contador avariado	Contador em funcionamento
Exp 3	12	Contador avariado	Contador em funcionamento
Exp 4	12	Contador avariado	Contador em funcionamento
Exp 5	12	Contador em funcionamento	Contador em funcionamento
Exp 6*	12	Contador em funcionamento	Contador em funcionamento
Exp 6	12	Contador em funcionamento	Contador em funcionamento
Exp 7	12	Contador em funcionamento	Contador em funcionamento
Exp 8	12	Contador em funcionamento	Contador em funcionamento
Exp 9	12	Contador em funcionamento	Contador em funcionamento

Tabela Anexo C - 4: Funcionamento do contador do ventilador e das resistências por experiência

	Ventilação [m.s⁻¹]	
	Aquecimento	Secagem
Exp 0	v=10 (predefinida)	v=3
Exp 1	v=10 (predefinida)	v=2
Exp 2*	v=10 (predefinida)	v=6
Exp 2	Velocidade igual	
Exp 3	Velocidade igual	
Exp 4	Velocidade igual	
Exp 5	Velocidade igual	
Exp 6*	Velocidade igual	
Exp 6	Velocidade igual	
Exp 7	Velocidade igual	
Exp 8	Velocidade igual	
Exp 9	Velocidade igual	

Tabela Anexo C - 5: Velocidade de ventilação por experiência

ANEXO D – ESTAÇÃO DE SECAGEM



Figura Anexo D - 1: Instalação de secagem



Figura Anexo D - 2: Serra mecânica para corte das amostras

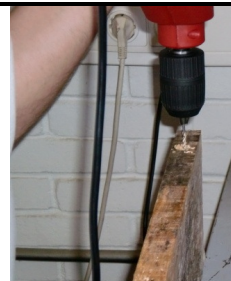


Figura Anexo D - 3: Berbequim para realização dos furos para os termopares

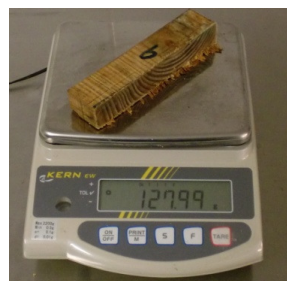


Figura Anexo D - 4: Balança para pesagem das amostras



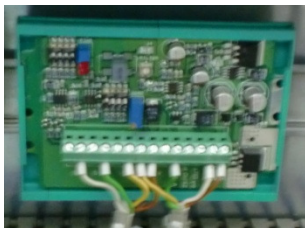
Figura Anexo D - 5: Estufa para secagem das amostras

ANEXO E – PEÇAS SUBSTITUÍDAS NA INSTALAÇÃO



Ponteira da sonda de medição da temperatura e humidade relativa do sistema

http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/HMP230_UserGuide.pdf



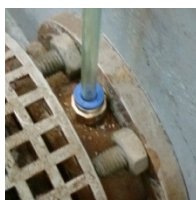
Amplificador de sinal da célula de carga

http://www.aep.it/Data_Sheet/Instruments/TA4.516.R3.pdf

Amplificador de sinal da célula de carga TA4/2

Sinal de entrada: 2mV/V

Sinal de saída: $\pm 10Vdc$



Foi mudado o engate do tubo de ar comprimido, que anteriormente era parcialmente de plástico, para um totalmente metálico. Devido as altas temperaturas o engate parcialmente plástico ficava danificado.



Contador do ventilador

<http://www.gavazzi-automation.com/pressdescr.asp?ID=48>

Tabela Anexo E - 1: Relação das peças mudadas na instalação